



Thema

Entwicklung einer grafischen Benutzeroberfläche zur Erprobung von Wechselwirkungen zwischen den Prozessparametern des Tiefziehprozesses

Name, Vorname: Weber, Paul

geboren am: 25.09.1993
in: Dresden

Forschungspraktikum

Modul MB-24 - Forschungspraktikum

Tag der Einreichung: 01.05.2017

Betreuender Hochschullehrer: Prof. Dr.-Ing. Majschak

Betrieblicher Betreuer: -

Betreuer der TU: Dipl.-Ing. Lukas Oehm

Geheimhaltungsgrad: -

Prof. Dr.-Ing. Jens-Peter Majschak
Professur Verarbeitungsmaschinen/ Verarbeitungstechnik
am Institut für Naturstofftechnik



AUFGABENSTELLUNG FÜR DEN BELEG FORSCHUNGSPRAKTIKUM

MODUL MB-24 - FORSCHUNGSPRAKTIKUM

im Studiengang Maschinenbau

Studienrichtung Verarbeitungsmaschinen- und Textilmaschinenbau

Name des Studenten Paul Weber

Thema: Entwicklung einer grafischen Benutzeroberfläche zur Erprobung von Wechselwirkungen zwischen den Prozessparametern des Tiefziehprozesses
Development of a graphical user interface for testing the interaction of the different parameters of the deep drawing process

Kurzthema: GUI Prozessparameter

Zielsetzung:

Die Komplexität von Verarbeitungsprozessen und damit von Verarbeitungsmaschinen und -anlagen nimmt stetig zu. Dadurch steigen zugleich die an den Maschinen- bzw. Anlagenbediener gestellten Anforderungen. Um diese bei deren Arbeitsaufgabe und insbesondere bei der Behebung von auftretenden Fehlern zu unterstützen, erscheint der Einsatz insbesondere von fallbasierten Assistenzsystemen sinnvoll. Eine Herausforderung beim Einsatz dieser Assistenzsysteme ist es, zu gewährleisten, dass die Bediener trotz der Unterstützung mitdenken und Vorschläge des Assistenzsystems kritisch hinterfragen. Daher sollen Assistenzsysteme die Möglichkeit bieten, die Auswirkungen von Handlungen der Bediener in Form von Parameteränderungen darzustellen, bevor sie an den Maschinen oder Anlagen tatsächlich realisiert werden.

Das Ziel der Aufgabe besteht in der Entwicklung einer interaktiven grafischen Benutzeroberfläche zur Erprobung von Wechselwirkungen zwischen den verschiedenen Parametern des Tiefziehprozesses faserbasierter Materialien. Der Nutzer soll mit Hilfe der zu entwickelnden Anwendung die Auswirkungen von Änderungen eines Eingabeparameters auf die Prozessparameter erproben können.

Zunächst ist im Rahmen einer Recherche zum Stand von Wissenschaft und Technik zu ermitteln, in welcher Art Parameteränderungen von Bedienern eingegeben werden können. Des Weiteren soll ermittelt werden, welche Software für die Entwicklung geeignet ist. Aufbauend auf bestehende Vorarbeiten sollen die Prozessparameter in geeigneter Form dargestellt werden. Die Art der Parameteränderung (bspw. diskret oder kontinuierlich) soll flexibel und nach Bedarf anpassbar sein. Darüber hinaus soll es möglich sein, einzelne Eingabeparameter für die Änderung zu sperren. Die Programmierung der Anwendung soll es ermöglichen, das zugrundeliegende Prozessmodell nach Bedarf anpassen zu können. Zudem ist eine Möglichkeit vorzusehen, Prozessdaten aus einem Versuchsaufbau zum Ziehen von Karton in die Anwendung einspielen zu können.

Betreuer der TU: Dipl.-Ing. Lukas Oehm

Ausgehändigt am: 01.01.2017

Einzureichen am: 01.05.2017

Zu beachten ist die „Richtlinie zur Anfertigung und Gestaltung von Studienarbeiten ab IJ12“.

Inhaltsverzeichnis

Kurzreferat	V
Abstract	VI
Verzeichnis verwendeter Formelzeichen	VII
Abkürzungen	VIII
1 Einleitung	1
2 Stand von Wissenschaft und Technik	2
2.1 Grundlagen zum Tiefziehen von Papier und Karton	2
2.1.1 Einführung und Begriffsdefinition	2
2.1.2 Kennzeichen und Kenngrößen der Ziehteilqualität	3
2.1.3 Einflussgrößen auf den Prozess	6
2.1.4 Stempelkraftverlauf	8
2.1.5 Vergleich von Kenngrößen der Ziehteilqualität und Kenngrößen aus dem Stempelkraftverlauf	10
2.2 Modellierung des Tiefziehprozesses	11
2.2.1 Einführung	11
2.2.2 Einschränkung des Modellraumes	11
2.2.3 Modellierung geometrischer Verhältnisse	12
2.2.4 Modellierung der Formänderungskräfte	12
2.2.5 Modellierung der Reibkräfte	14
2.2.6 Modellierung des gesamten Stempelkraftverlaufs	15
2.3 Entwicklung einer grafischen Benutzeroberfläche	16
2.3.1 Einführung in die Mensch-Computer-Interaktion	16
2.3.2 Phasen der Entwicklung	18
2.3.3 Dialoggestaltung	20
2.3.4 Informationsgestaltung	25
2.4 Zusammenfassung	30
3 Präzisierte Aufgabenstellung	31
4 Zielstellung und Lösungsweg	32
5 Erarbeitung von Anforderungen an die graphische Benutzeroberfläche	33
5.1 Nutzerkontextbeschreibung	33

5.2	Analyse einzugebender Parameter	34
5.3	Darstellung auszugebender Parameter	37
5.4	Anforderungsliste	39
6	Programmiertechnische Umsetzung	39
6.1	Wahl des Programmierwerkzeuges	39
6.2	GUI mit direkter Erzeugung der Darstellung	40
6.2.1	Aufbau der Benutzeroberfläche	40
6.2.2	Erklärung der Programmstruktur	41
6.3	GUI mit Erzeugung der Darstellung über das Prozessmodell	43
6.3.1	Aufbau der Benutzeroberfläche	43
6.3.2	Erklärung der Programmstruktur	46
6.3.3	Umsetzung des Prozessmodells	49
7	Schlussbemerkung	50
8	Zusammenfassung	52
	Literaturverzeichnis	X
	Abbildungsverzeichnis	XII
	Tabellenverzeichnis	XIII
	Anhangsverzeichnis	XIV

beigelegte CD/DVD-ROM enthält:

- ...PDF-Dokument: Dokumentation des Beleges
- ...Exe-Datei: GUI mit Prozessmodell
- ...Exe Datei: GUI ohne Prozessmodell
- ...Matlab-Script: GUI mit Prozessmodell
- ...Matlab-Script: GUI ohne Prozessmodell
- ...Excel-Dateien: Messwerte von Dr. Hauptmann
- ...Matlab-Script: Einlesen von Messwerten

Kurzreferat

Die vorliegende Arbeit hat die Entwicklung und Umsetzung einer graphischen Benutzeroberfläche zur Erprobung von Wechselwirkungen zwischen verschiedenen Prozessparametern beim Tiefziehen von faserbasierten Materialien, wie Papier und Karton, zum Ziel.

Nach einer Recherche zum Prozess des Tiefziehens und seiner Modellierung folgt das Erarbeiten von Grundsätzen bei der Erstellung und Gestaltung von graphischen Benutzerschnittstellen. Insbesondere steht dabei die Art der Eingabe von numerischen Parametern und die Visualisierung von Informationen im Vordergrund.

Bei der Erstellung des Layouts des Graphical User Interface (GUI) werden die aus der Recherche gewonnenen Erkenntnisse genutzt. Dazu werden alle Anforderungen, die an die Benutzerschnittstelle gestellt werden können, zusammengetragen.

Bekannte Annahmen zur Modellierung des Tiefziehprozesses werden aus Vorarbeiten verwendet. So wird innerhalb des Programmcodes der GUI der Stempelkraftverlauf beim Tiefziehen mit seinen charakteristischen Kennwerten erzeugt. Diese Kennwerte werden in einer ausgewählten Darstellungsform auf der Oberfläche für den Nutzer anschaulich präsentiert. Ein Vergleich mit den charakteristischen Werten einer Referenz in der Darstellung erlaubt eine Aussage über die Qualität des zu produzierenden Ziehformteiles.

Nach der Implementierung der GUI werden abschließend Potentiale für weiterführende Arbeiten offengelegt.

Abstract

The aim of this thesis is the development and implementation of a GUI for testing interactions between different process parameters in the deep drawing of fibre based materials such as paper and cardboard.

After an investigation of the process of deep drawing and its modelling, the elaboration of principles of the creation and the design of the GUI follows. The main focus concentrates in particular on the type of input of numerical parameters and the visualization of information.

Based on the findings from the research, the layout of the GUI is created. To this end, all requirements that can be posed on the user interface are combined.

Known assumptions for the modelling of the deep drawing process are used from preliminary work. Thus, within the program code of the interface, the punch force profile during deep drawing is generated with its characteristic values. These characteristic values are displayed in a selected presentation form on the user's surface. A comparison with the characteristic values of a reference in the presentation allows a statement about the quality of the drawing part to be produced.

After the implementation of the GUI the potentials for further development are finally disclosed.

Verzeichnis verwendeter Formelzeichen

a	Ziehspalt
A	Fläche
b	Breite
d	Dicke
D	Durchmesser
E	Summe der Stempel- und Ziehbüchsentemperatur
F	Kraft
h	Höhe
i	Faltenanzahl
K	Empirischer Faktor
l	Länge
p	Druck
r	Radius
s	Weg
T	Temperatur
U	Umfang
α	Winkel, Koeffizient für thermische Längenänderung
δ	Faltenabstand
Δ	Differenz
κ	Relative Komprimierung von Karton unter Belastung in z-Richtung
μ	Reibungskoeffizient
π	Kreiszahl
φ	Biegewinkel

Abkürzungen

Exp	Experte
Fa	Falten
FEM	Finite-Elemente-Methode
FH	Faltenhalter
GUI	Graphical User Interface
int	interpoliert
Ko	Komprimierung
max	Maximum
MCI	Mensch-Computer-Interaktion
MD	Längsrichtung zur Faser des Kartons (Machine Direction)
min	Minimum
MMI	Mensch-Maschine-Interaktion
MMS	Mensch-Maschine-System
Nov	Novize
o	oben
Pr	Probe
r	radial
R	Reibung
St	Stauchung
ST	Stempel
SCT	Streifenstauchwiderstand
u	unten
U	Umgebung
Z	Zug
ZB	Ziehbüchse
ZT	Ziehteil

1 Einleitung

Verpackungsmaschinen bzw. Verpackungsanlagen, als komplexe Verkettung einzelner Verarbeitungsmaschinen, sind vor allem durch eine hohe Produktivität in Folge ihrer hohen Arbeitsgeschwindigkeiten gekennzeichnet. Problematisch bei ihrem Betrieb ist jedoch die Unumgänglichkeit zufällig auftretender Störungen. Durch diese kann die gestellte Verarbeitungsaufgabe nicht mehr erfüllt werden, sodass keine qualitätsgerechten Produkte erzeugt werden und enorme finanzielle Verluste hinzunehmen sind. Effektivitätsanalysen haben aufgezeigt, dass durchschnittlich etwa nach 4.5 min eine Störung, welche zum Anlagenstillstand führt, auftritt [1]. Neben diesen ungeplanten Stillständen führen auch geplante Stillstandszeiten, etwa für das Umrüsten, Warten und Reinigen der Anlage, zu einer Minderung der Qualitätszeit zur Herstellung anforderungsgerechter Produkte. Viele der ungeplanten Störungen können in weniger als zwei Minuten durch das Bedienpersonal behoben werden und werden daher als Mikrostörungen bezeichnet [2]. Verlängert sich jedoch die Zeit zur Beseitigung der Störung, kommt es zu erheblichen Ausbringungsverlusten. Durch die Entwicklung von Assistenzsystemen soll dem Bediener in solchen Situationen geholfen werden, die Störung schnell identifizieren und beheben zu können. Oftmals ist eine längere Ausfallzeit schon der Tatsache geschuldet, dass nicht ausreichend qualifiziertes Bedienpersonal an komplexen Anlagen eingesetzt wird. Entscheidend ist es demnach, dass ein solches Assistenzsystem vor allem auf den nicht versierten Nutzer, der nur begrenztes Prozesswissen hat, abgestimmt ist. Daher ist es sinnvoll dem Bediener die Folgen seines Handelns an der Maschine bzw. Anlage bewusst zu machen und aufzuzeigen, inwieweit sich seine getätigten Einstellungen der Prozessparameter auf den Prozess und somit auf die Qualität des Produktes auswirken. So wird es möglich, zum einen Störungen und Ausschussproduktion von Anfang an zu minimieren, sowie zum anderen ein besserer Umgang mit der Anlage in Störungssituationen, durch das gesteigerte Prozessbewusstsein, gewährleisten zu können.

2 Stand von Wissenschaft und Technik

2.1 Grundlagen zum Tiefziehen von Papier und Karton

2.1.1 Einführung und Begriffsdefinition

In der Verarbeitungstechnik ist das Formen eines der 7 Hauptgruppen nach [3]. Dieses unterteilt man in das Urformen und das Umformen. Wobei beim Umformen eine bereits vorhandene Form des Verarbeitungsgutes durch die Einwirkung von Arbeitsorganen, ohne Änderung der Masseigenschaften, modifiziert wird. Auch das Tiefziehen von Karton und Papier als mehrdimensionaler Umformprozess des Zugdruckumformens kompressibler Materialien, kann dieser Verfahrensgruppe zugeordnet werden [4]. Ziel des Verfahrens ist die Herstellung eines mehrdimensionalen Hohlformkörpers (Abbildung 2.1) mit einseitig geschlossenem Boden aus dem planarem Halbzeugzuschnitt (auch als Ronde bezeichnet) [5].

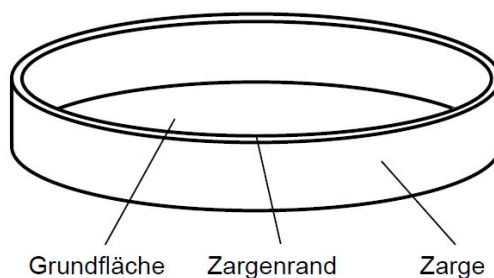


Abbildung 2.1: Charakteristisches Formteil als Ergebnis des Ziehprozesses aus [5]

Während des Prozesses wird die Ronde durch den Stempel in die Ziehbüchse gedrückt. Hauptmann unterscheidet dabei in eine offene und geschlossene Prozessvariante [5]. Bei der geschlossenen Verfahrensvariante (Abbildung 2.2a) wird der Karton in die Matrice eingepreßt, dadurch verpresst und abschließend entgegen der Ziehrichtung entformt. Hingegen wird das Ziehteil beim offenen Prozess (Abbildung 2.2b) durch eine geöffnete Ziehbüchse in Richtung der Umformung ausgegeben. Ein Gegenhalter kann hier laut [5] zusammen mit dem Stempel als Prägewirkpaarung eine Prägung der Formteilgrundfläche realisieren. Auch bei der geschlossenen Variante kann ein bspw. gefederter Gegenhalter zur zusätzlichen Verpressung und Entformung eingesetzt werden. Durch das Umformen selbst tritt eine erhöhte Faltenbildung an der Zarge auf, da das zu verarbeitende Material keine Fließeigenschaften besitzt. Gemein ist beiden Varianten die Verwendung eines Faltenhalters, der als Gegenfläche zur Ziehbüchsenstirnfläche, die erwünschte gleichmäßige Verteilung dieser Falten in der Zarge bewirkt [6]. Ne-

ben dieser mechanischen Umformung, durch den bewegten Stempel und die unbewegte Ziehbüchse, findet zusätzlich ein Einsatz thermischer Energie zur Verbesserung der Halbzeugformbarkeit, sowie zur Trocknung und Kompression des Materials [4], sodass letztlich die mehrdimensionale Zielform aufrecht erhalten bleibt, statt. Die thermische Energie wird über den beheizten Stempel und die beheizte Ziehbüchse in das Material eingeleitet.

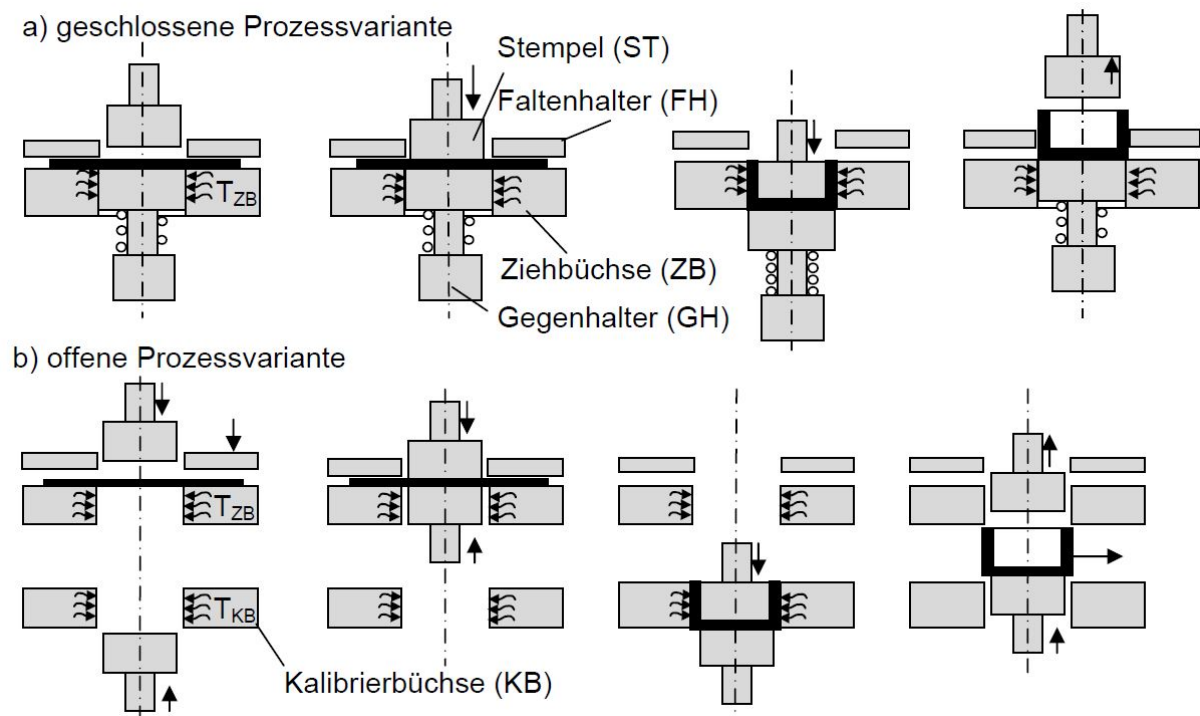


Abbildung 2.2: Schematischer Prozessablauf beim Ziehen von Papier und Karton aus [5]

2.1.2 Kennzeichen und Kenngrößen der Ziehteilqualität

Um den Prozess des Tiefziehens und den Einfluss der jeweiligen einstellbaren Prozessparameter auf das Formteil einschätzen zu können, ist es von Nöten, Aussagen über die Qualität erzeugter Ziehformteile zu machen. Dabei ist eine Definition qualitätsgerechter Formteile zielführend.

Als Bewertungsgrundlage sind bisher vor allem optische Betrachtungen der Formteile etabliert. Sie beruhen zumeist auf der subjektiven Empfindung von Marketing- und Anwendungstechnikern [5]. Demnach ist ein gutes Aussehen durch einen hohen Glättungsgrad der Oberfläche, eine gleichmäßige Faltenverteilung, sowie eine Vermeidung von Verbrennung und Blasenbildung gekennzeichnet [7].

Zur genaueren Quantifizierung der Qualität von Ziehformteilen sind jedoch zusätzlich quantifizierbare Größen notwendig. Hauptmann hat hierzu in [5] entsprechende Größen aufgestellt, dabei jedoch Formteile mit gravierenden Defekten, wie erkennbare strukturelle Schädigungen, aus den Betrachtungen ausgeschlossen. Schließlich ist es gelungen die Grundlage für eine detailliertere und dadurch differenzierbare Bewertung intakter Formteile zu schaffen. Die Beurteilung mit Hilfe der aufgestellten Größen lässt sich in Formhaltigkeit, Formstabilität und optische Qualität gliedern [5].

Durch eine hinreichende Verpressung der Falten, die beim Tiefziehen ausdrücklich erwünscht sind, wird die Komprimierung und somit die Formhaltigkeit des Materials nach HEINZ [7] erzeugt. In dieser Publikation wird ein erster Ansatz für die Quantifizierung aufgestellt:

$$\text{Formhaltigkeit} = \frac{\text{bleibende Verformung}}{\text{Gesamtverformung}} \cdot 100 \quad (2.1)$$

Folglich steigt die **Formhaltigkeit** mit wachsender prozentualer Kennzahl. Der Rückstellwinkel und die Durchbiegung sind hierzu erweiternde von HAUPTMAN [5] eingeführte Kenngrößen. Die Durchbiegung ist definiert als der horizontale Abstand a zwischen dem gerade verlaufenden Zagenrand und dem Endpunkt der, durch den plastischen Verformungsanteil bei der Formung an der Ziehbüchsenrundung erzeugten, Durchbiegung. Hingegen bezeichnet der Rückstellwinkel den Winkel zwischen einer als ideal angesehen Senkrechten, in Bezug zum Boden des Formteils, und dem tatsächlichen Zagenrand (Abbildung 2.3).

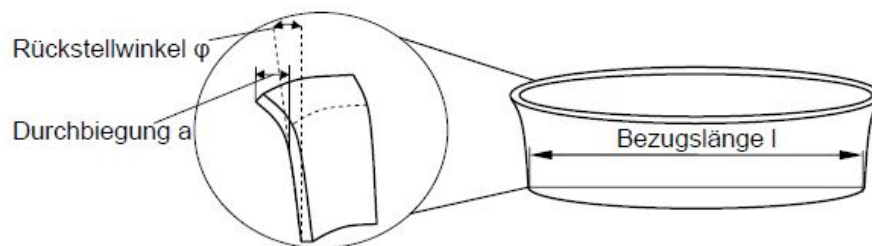


Abbildung 2.3: Schematische Darstellung der Messgrößen Rückstellwinkel φ und Durchbiegung a der Zarge am Formteil aus [5]

Die **Formstabilität**, unter der man eine definierte Festigkeit der Materialverpressung versteht, sorgt letztlich für den Widerstand gegenüber den Rückstellkräften aus der Biegung bei der Umformung und einem möglichen Nachtrocknen [5]. Als vergleichende Größe führt Hauptmann hierzu die Zugfestigkeit von Materialprobestreifen aus der Zarge ein, die mit Hilfe eines einachsigen Zugversuch ermittelt wird. Folglich kann die stabilitätsgebende Verpressung der Falten im Ausgangsmaterial quantifiziert werden.

Kennzeichnend für die **optische Qualität** sind neben dem Auftreten möglicher Defekte, wie lokale bzw. einheitliche Schwärzungen, Vergilbung, Risse in der Zarge und/oder dem Bodenrand, sowie Zipfelbildung und Blasenbildung im Zargenbereich, laut [5] die Faltenanzahl und die Verteilung dieser in der Zarge. Idealerweise sind viele kleine und gleichmäßig verteilte Falten vorhanden. Aufgrund der vorliegenden Proportionalität zwischen Faltenabstand und Faltenanzahl, wird der Faltenabstand und seine Standardabweichung als direkte und messbare Größe für die Anzahl und die Gleichmäßigkeit der Faltenverteilung und somit für die optische Qualität angenommen [5]. Darüberhinaus existiert laut HAUPTMANN [5] ein direkter Zusammenhang zwischen dem Auftreten lokaler Schwärzungen (Abbildung 2.4) bzw. Zipfelbildung (Abbildung 2.5) und der Faltenanzahl und -verteilung.

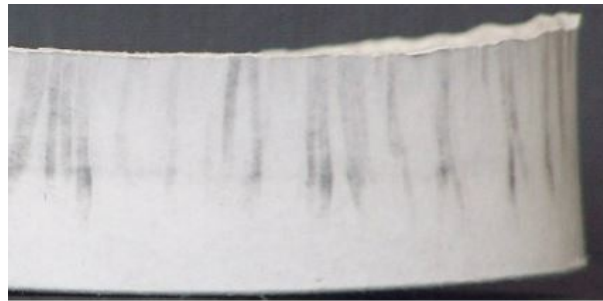


Abbildung 2.4: lokale Schwärzungen an der Zarge eines Formteils aus [5]

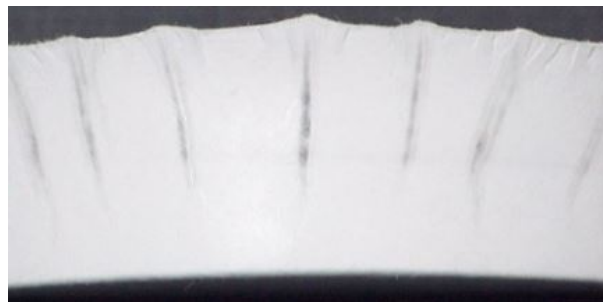


Abbildung 2.5: Zipfelbildung an der Zarge eines Formteils aus [5]

Um eine einheitliche Bewertung für die Gesamtqualität eines Ziehformteils vornehmen zu können, erläutert HAUPTMANN in [5] einen eigens eingeführten Qualitätskennwert. Nach Normierung der bereits erklärten Einzelkennwerte nach

$$X_{Q,i} = \frac{(x_i - x_0)}{(x_{max} - x_0)} \text{ mit } 0 \leq X_{Q,i} \leq 1 \quad (2.2)$$

wobei x_i ...Mittelwert der jeweiligen Qualitätsgröße eines Versuchspunktes i , x_0 ...kleinster aufgetretener Wert aller Messungen, x_{max} ...größter aufgetretener Wert aller Messungen

ist, ergibt sich der Gesamtqualitätswert Q aus Zargendurchbiegung b , Rückstellwinkel φ_R , Faltenabstand F , zugehörige Standartabweichung s_F und Zugarbeit A_z zu

$$Q = X_b + X_{\varphi_R} + (X_F + X_{s_F}) - X_{A_z} \text{ mit } -1 \leq Q \leq 3 \quad (2.3)$$

Zusammenfassend sind demnach folgende Kennzeichen und Kenngrößen für ein qualitätsgerechtes Ziehformteil erstrebenswert:

- geringer Gesamtqualitätskennwert
- geringe Zargendurchbiegung
- geringer Rückstellwinkel
- geringer Faltenabstand und gleichmäßige Faltenverteilung
- hohe Zugfestigkeit der verpressten Falten
- Nichtvorhandensein struktureller Schädigungen
- glatte und gleichmäßige Oberfläche

2.1.3 Einflussgrößen auf den Prozess

Um im weiteren Verlauf der Arbeit den Einfluss und die Wechselwirkungen der Prozessparameter, vor allem in Hinblick auf das Erzielen qualitätsgerechter Ziehformteile, darstellen zu können, ist eine allgemeine Auflistung der Einflussgrößen auf den Ziehprozess unumgänglich. HAUPTMANN liefert dazu eine Übersichtstabelle (Tabelle 2.1) in [5].

Tabelle 2.1: Systematik der Einflussgrößen auf den Ziehprozess von Karton

Material		
Stoffbedingte Eigensch.	Strukturbed. Eigensch.	Grundeigenschaften
Faserart	Porosität	Viskoelastizität
Fasereigenschaften	Blattbildungsprozess	Anisotropie
Füll- und Hilfsstoffe	Ausrüstung, Veredelung	Inhomogenität
Mengenanteile	Lagenaufbau	Zweiseitigkeit
	Flächenbezogene Masse	Hygroskopizität
	Dichte	
Rheologische Eigensch.	Sorptive Eigenschaften	Oberflächenschaften
Biegesteifigkeit	Adsorption, Desorption	Rauheit
Komprimierbarkeit	Quellung, Schrumpfung	
Zugfestigkeit	Feuchte, Präparation	
Dehnungen	Wärmeleitung	
Stauchfestigkeit	Wärmeübergang	
Technologie		
Form- und Format	Form- und Format	Prozess
Geometrie der Grundfläche	Ziehspaltbreite	Temperatur Ziehbüchse
Bodenrundung	Ziehbüchsenrundung	Temperatur Stempel
Format	Konizität Stempel	Temp. Kalibrierbüchse
Ziehhöhe	Stempelrundung	Temperaturverteilung
	Höhe der Ziehbüchse	Temp.-differenz
	Werkstoff	Faltenhalterkraft
	Oberflächenrauheit	
Bewegungstechnik		
Wegverlauf	Bewegungsgesetze	Taktzeit
Geschwindigkeitsverlauf	Bewegungssynchronisation	Regelabweichung
Beschleunigungsverlauf	Trägheiten	Regelgüte

Im Bereich der Modellbildung werden diese Einflussfaktoren beschränkt, um so Modellgrenzen abzustecken.

2.1.4 Stempelkraftverlauf

Entscheidend für die spätere Modellierung des Tiefziehprozesses von Papier und Karton ist der charakteristische Verlauf der Kraft am Stempel. Die Gesamtkraft am Stempel setzt sich nach [5] aus verschiedenen Kraftanteilen zusammen:

$$F_{ST,ges} = F_{kin} + F_{stat} + F_r + F_{tech} \quad (2.4)$$

Der Anteil F_{tech} umfasst dabei alle durch das Verarbeitungsgut erzeugten Kraftanteile. HAUPTMANN [5] geht davon aus, dass diese kennzeichnend für die Wirkmechanismen beim Umformen sind und den Einfluss der Prozessparameter aufzeigen. Die kinetostatische Kraft F_{tech} , als Summe der durch Trägheiten in der Mechanik erzeugten Kraftanteile, sowie den Einfluss der Gewichtskraft F_{kin} und der Reibkräfte F_r in der mechanischen Übertragungsstrecke schließt er durch Annahmen und Vereinfachungen aus, sodass sich der charakteristische Kraftverlauf (Abbildung 2.6), wie folgt, nur aus dem Kraftanteil F_{tech} ergibt:

$$F_{ST,ges} = F_{tech} = F_{R,FH} + F_{R,ZB} + F_{R,EK} + F_{ST} + F_B \quad (2.5)$$

HAUPTMANN beschreibt weiter, dass sich diese Kraft aus den Reibkräften unter dem Faltenhalter $F_{R,FH}$, in der Ziehbüchse $F_{R,ZB}$ und an der Einlaufkante $F_{R,EK}$ sowie der Kraft durch Stauchung des Kartons in Blattebene zu Falten F_{ST} und der Kraft infolge der Biegung des Kartons F_B zusammensetzt.

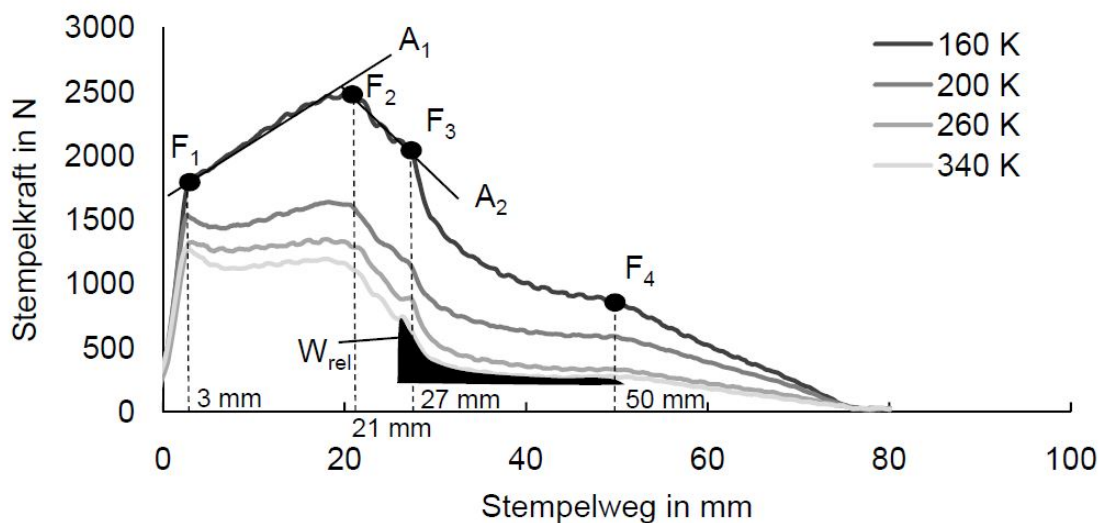


Abbildung 2.6: Kenngrößen des Kraftverlaufes am Beispiel der Variation der Temperatursumme aus [5]

Durch Variation der Prozessparameter verändert sich der charakteristische Verlauf. Beispielfhaft zeigt dies HAUPTMANN in der Abbildung 2.6 durch Manipulation der Temperatursumme von Ziehbüchsen- und Stempeltemperatur [5].

Betrachtet man den Kraftverlauf weiter, so zeigen sich vier charakteristische Punkte im Kraftverlauf, die Hauptmann mit F_1 , F_2 , F_3 und F_4 bezeichnet. Ändert sich durch Prozessparametervariation der Kraftverlauf, so ändert sich dieser vor allem durch Verschiebung der einzelnen Punkte. Daraus ergeben sich, so erläutert Hauptmann, die charakteristischen, annähernd linearen Anstiege zwischen 10 mm und 20 mm (A_1) bzw. zwischen 20 mm und 27 mm Stempelweg (A_2). Bei Beginn des Prozesses fährt der Stempel zunächst von seiner Ausgangsposition bis hin zur Kartonoberfläche der Ronde, der Stempelnulldposition, und legt danach eine Strecke, welche circa der Summe der Werkzeuggrundungsradien von Stempel und Ziehbüchse entspricht, zurück. Dieser Weg bis zur charakteristischen Kraft F_1 ist laut HAUPTMANN maßgeblich für die Vorverdichtung des Packstoffes.

Im weiteren Verlauf des Tiefziehprozesses entstehen die typischen Falten im Material, die schlussendlich im Ziehspalt, zwischen Stempel und Ziehbüchse, verpresst werden. Diese Komprimierung bedingt den Anstieg A_1 durch steigende wirkende Reibkräfte im Bereich von F_1 bis F_2 .

Ist das Ziehteil nun ab dem Punkt F_2 vollständig in die Büchse eingezogen und weist keine Kontaktstellen mehr mit dem Faltenhalter auf, beginnt die Abnahme des Kraftverlaufes bis zum Kraftpunkt F_3 . Dieser mit A_2 beschriebene Anstieg lässt Rückschlüsse auf das Ende der Faltenbildung zu [5]. SCHERER [6] erklärt den Anstieg ebenso mit dem vollendeten Verpressen des Packstoffes im Ziehspalt.

Zwischen F_3 und F_4 sinkt die Stempelkraft weiter ab. Der Verlauf wird bedingt durch den zusammengesetzten Zieh Widerstand, bestehend aus der abfallenden Stauchkraft, resultierend aus der Geometrie und der Reibkraft zwischen Stempel und Packstoff sowie Ziehbüchse und Packstoff [8]. Aufgrund des konischen, sich nach oben verjüngenden Stempels, wird der Ziehspalt im Verlauf nach oben hin kontinuierlich größer, sodass sich die Normalkraft auf die Mantelfläche verringert. Infolge dessen ergibt sich der absinkende Verlauf.

Nach Erreichen des Kraftpunktes F_4 verlässt das Ziehteil die Ziehbüchse nach und nach und der Verlauf sinkt daraufhin kontinuierlich, bis zum kompletten Verlassen des Ziehteils aus der Ziehbüchse, auf Null ab.

Im Bereich zwischen 20 mm und 50 mm Stempelweg findet also die Verpressung und Relaxation des Materials in der Ziehbüchse statt, sodass man hier die zugehörige Arbeit über die unter dem Graphen liegende Fläche berechnen kann. Nach Abzug der

Reibarbeit im gleichen Wegbereich bei F_4 kann der Reibungseinfluss verringert werden [5].

2.1.5 Vergleich von Kenngrößen der Ziehteilqualität und Kenngrößen aus dem Stempelkraftverlauf

HAUPTMANN erläutert in seiner Dissertation [5] den Zusammenhang zwischen den Kenngrößen der Ziehteilqualität (Kapitel 2.1.2, Seite 3) und den charakteristischen Kennwerten aus dem Stempelkraftverlauf (Kapitel 2.1.4, Seite 8). So kann unter Zuhilfenahme des Kraftverlaufes, insbesondere mit dem darin enthaltenen Anstieg A1 und der Kraft F_4 , eine Tendenz für die optische Qualität des hergestellten Formteiles abgeleitet werden. Hingegen sind die Formhaltigkeit und die Formstabilität nach HAUPTMANN, aufgrund sich gegenseitig beeinflussender Wirkungen, nur bedingt mit den Kennwerten des Stempelkraftverlaufes beschreibbar. Der Qualitätskennwert Q, als Zusammensetzung aller Kenngrößen für die Ziehteilqualität, kann folglich ebenso nicht allumfassend durch den Verlauf erklärt werden.

Es bleibt festzuhalten, dass eine vollständige Vorhersage der Ziehteilqualität durch den Stempelkraftverlauf nicht möglich ist. Tendenzen sind jedoch ableitbar, sodass der Stempelkraftverlauf als Simulationsgrundlage zur Vorhersage der Ziehteilqualität verwendet werden kann.

2.2 Modellierung des Tiefziehprozesses

2.2.1 Einführung

Die Modellierung des Tiefziehprozesses von Karton und Papier bildet die Grundlage für die Prozesssimulation. Entscheidend ist diese vor allem für das Vorhersagen optimaler Prozessparameter für das Erzeugen qualitätsgerechter Ziehformteile ohne die Durchführung konkreter Versuche.

Ein vollständiges Modell für das Tiefziehen von Papier und Karton setzt sich aus einem Anlagen-, Prozess- und Materialmodell zusammen [9]. Erste Vorstellungen fasst HAUPTMANN in [5], vor allem hinsichtlich des Anlagen- und Prozessbereiches, zusammen. Er versucht dabei, eine Näherung für den in Kapitel 2.1.4 vorgestellten Stempelkraftverlauf zu finden. WALLMEIER entwickelte hingegen in [9] ein Konzept zur Umsetzung des Materialmodells. Darüber hinaus realisierte er ein Modell auf Basis der Finite-Elemente-Methode (FEM), welches in [10] vorgestellt wird. Mit Hilfe dieses einfachen Modells kann die Anisotropie und Plastizität von Pappe bzw. Karton, die von Bedeutung für das Umformen während des Tiefziehens ist, beschrieben werden. Es existiert jedoch kein allumfassend beschreibendes Modell des Prozesses. Die Erarbeitung eines solchen ist eine der gegenwärtigen Herausforderungen wissenschaftlicher Untersuchungen des Tiefziehens von Karton und Pappe.

Für die Entwicklung des GUI ist die Modellierung des Stempelkraftverlaufs von Bedeutung, denn die Beziehungen zwischen den Kenngrößen des Kraftverlaufes und den Qualitätskriterien der Formteile ermöglichen die Vorhersage der Formteilqualität [5]. Im Anschluss soll daher das betreffende Modell von HAUPTMANN dafür erläutert werden.

2.2.2 Einschränkung des Modellraumes

Grundlage für das Modell nach HAUPTMANN ist die erläuterte Vereinfachung der Zusammensetzung der Stempelkraft (Gleichung 2.5). Darüber hinaus wird bei der Modellbildung nur der Bereich der Prozessparameter betrachtet, innerhalb dessen keine strukturellen Schäden am Ziehformteil, wie Risse, Blasen oder Kriechbrüche auftreten. Sie würden den Verlauf der Kraft unvorhersehbar ändern. HAUPTMANN erstellt das Modell zudem nur für eine spezifische Kartonsorte und hält die Geometrie der Umformwerkzeuge konstant fest. Auch ist das Modell nur für eine bestimmte Ziehgeschwindigkeit gültig. Damit ergeben sich nach Tabelle 2.2 folgende Modellgrenzen.

Tabelle 2.2: Gültigkeitsgrenzen für die Modellierung

Parameter	Wertebereich
Faltenhalterkraft	500-2000 N
Temperatursumme	200-400 K
Temperaturdifferenz	0-100 K
Material	MM ZKH
Flächenbezogene Masse	510 $\frac{\text{g}}{\text{m}^2}$
Ziehhöhe	25 mm
Durchmesser Ziehbüchse	110 mm
Ziehspalt (max.)	0.45 mm
Radien ZB/ST	3 mm/0.2 mm
Konizität ST	0 – 0,59°

2.2.3 Modellierung geometrischer Verhältnisse

Durch die Konizität des Stempels und die Rundungsradien von Ziehbüchse und Stempel beim Einlauf des Materials in die Ziehbüchse, ergibt sich ein charakteristischer und damit nicht konstanter Verlauf der Breite des Ziehspaltes a über dem zurückgelegten Stempelweg s_{ST} . Der Ziehspalt ist eine bedeutungsvolle Größe für die Modellierung des Kraftverlaufs. HAUPTMANN beginnt seine Modellierung mit der Aufstellung dieses Verlaufes und weiterer zugehöriger grundsätzlicher geometrischer Größen.

Die einzelnen zugehörigen Berechnungsvorschriften sind zusammengefasst dem Anhang D.1 entnehmbar.

2.2.4 Modellierung der Formänderungskräfte

HAUPTMANN beschreibt, dass innerhalb des Ziehprozesses Formänderungskräfte durch Stauchung, Materialkomprimierung und -biegung wirksam sind. Die Stauchung kann durch die hervorgerufene Zugbeanspruchung, beim Erreichen der Bruchlast des Materials, zu einem Riss führen. Durch die Komprimierung, also definierte Verdichtung des Materials, wird im Prozess eine Kraft $F_{N,ZB}$ erzeugt, die zudem eine Reibkraft $F_{R,ZB}$ zur Folge hat (Abbildung 2.7).

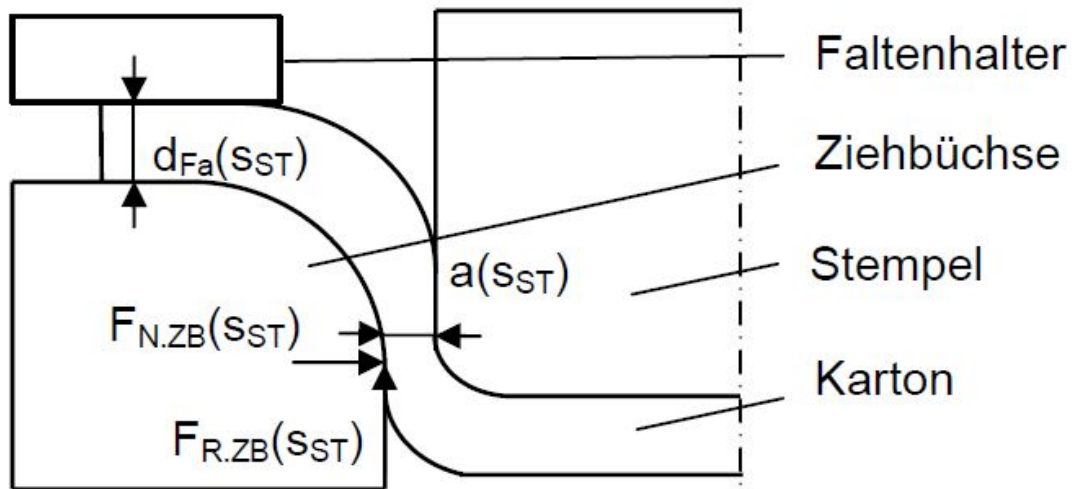


Abbildung 2.7: Schematische Darstellung der Verhältnisse in der Ziehbüchse aus [5]

Die Ermittlung der tatsächliche Presskraft $F_{N.ZB}$ in der Ziehbüchse, die indirekt Bestandteil des Stempelkraftverlaufes ist, wird im Anhang D.2 genauer vorgestellt.

Neben dieser in z-Richtung wirkenden Kraft treten auch in der Blattebende der Ronde Beanspruchungen auf. HAUPTMANN beschreibt dazu Druckspannungen, die beim Einziehen des Karton in die Ziehbüchse durch den entstehenden Materialüberschuss hervorgerufen werden. In Abhängigkeit vom Stempelweg wird der Karton um den Weg l_{ST} (Abbildung 2.8) gestaucht. HAUPTMANN wählt einen vereinfachten Modellierungsansatz, da es bisher nicht möglich ist den Materialquerschnitt in Abhängigkeit vom Stempelweg s_{ST} über eine geeignete Messung zu erfassen. So geht er davon aus, dass die Stauchkraft an einer Falte über den gesamten Querschnitt hinweg wirksam ist.

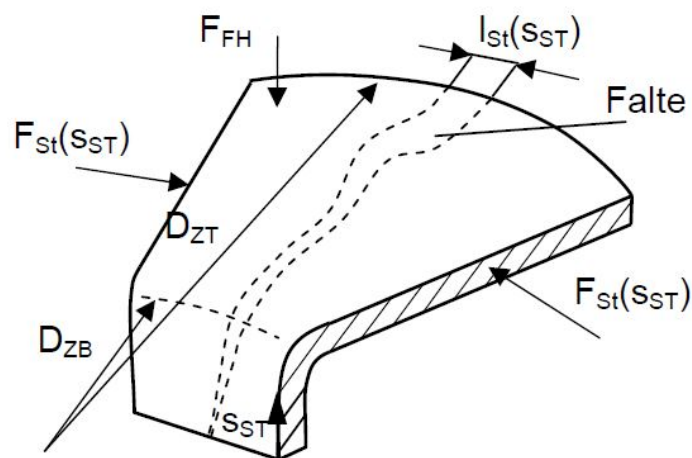


Abbildung 2.8: Schematische Darstellung der Verhältnisse im Flanschbereich aus [5]

Die mathematischen Herleitungen zur Modellierung der Stauchkraft, als Widerstand gegen das Einziehen des Materials und der daraus schlussendlich resultierenden Zugbeanspruchung, finden sich im Anhang D.2 wieder.

Schlussendlich beschreibt HAUPTMANN noch Beanspruchungen, die durch Biegung, beim Einziehen des Materials in die Ziehbüchse, hervorgerufen werden. Es wirkt eine Summe von Biegekräften am Stempel (Abbildung 2.9) bestehend aus

- Biegekräften um die Stempelrundung $F_{B.1}(s_{ST})$,
- Biegekräften um die Ziehbüchsenrundung $F_{B.2}(s_{ST})$, der Rückbiegekräft der Zarge $F_{B.3}(s_{ST})$ und
- aus der Biegekräft um die Grundflächeengeometrie $F_{B.4}(s_{ST})$.

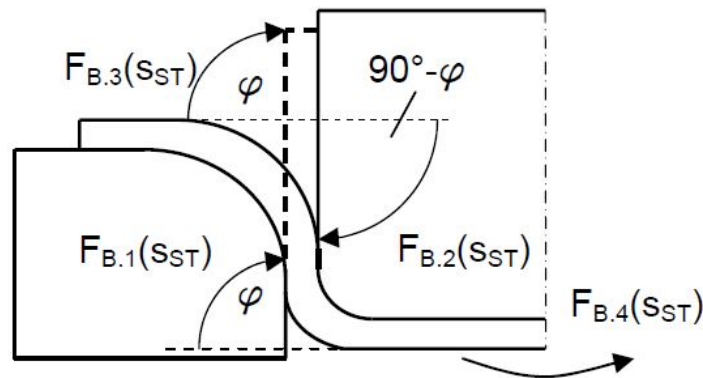


Abbildung 2.9: Biegestellen beim Ziehprozess von Karton aus [5]

Die Kräft $F_{B.4}(s_{ST})$ wird für die Modellierung durch HAUPTMANN vernachlässigt. Die Aufstellung der übrigen Kräfte kann dem Anhang D.2 entnommen werden.

2.2.5 Modellierung der Reibkräfte

Laut HAUPTMANN haben die Reibkräfte einen großen Anteil an der Gesamtkräft, die am Stempel wirkt. Unter dem Faltenhalter entsteht durch die Faltenhalterkräft F_{FH} , welche gezielt eingestellt werden kann, eine Reibkräft $F_{R.FH}(s_{ST})$, die an zwei Reibstellen wirkt (Abbildung 2.10).

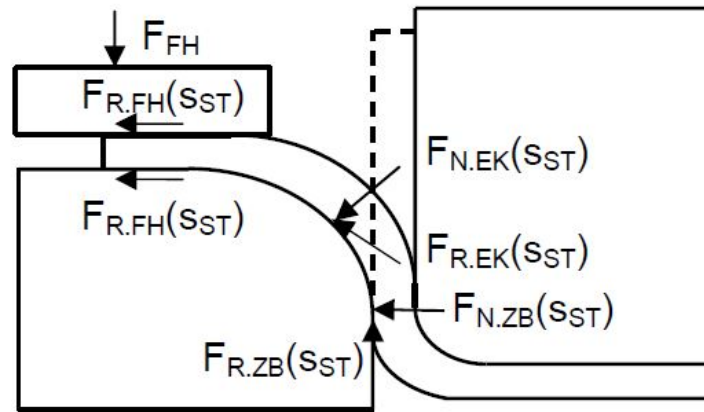


Abbildung 2.10: Reibkräfte innerhalb des Ziehprozesses von Karton

Die bereits eingeführte Normalkraft $F_{N.ZB}(s_{ST})$, durch Komprimierung des Materials in der Ziehbüchse, bedingt eine entsprechende Reibkraft $F_{R.ZB}(s_{ST})$ (Abbildung 2.10). Darüberhinaus wirkt eine Reibkraft $F_{R.EK}(s_{ST})$ beim Einziehen des Materials an der Ziehbüchsenrundung. Die Berechnung dieser im Modell wird im Anhang D.3 dargestellt.

2.2.6 Modellierung des gesamten Stempelkraftverlaufs

Nach dem Aufstellen aller benötigten stempelwegabhängigen Teilkräfte kann nun daraus der gesamte Verlauf der Stempelkraft, wie folgt, zusammengesetzt werden (Gleichung 2.6).

$$F_{ST.ges}(s_{ST}) = F_{R.FH}(s_{ST}) + F_{R.EK}(s_{ST}) + F_{R.ZB}(s_{ST}) + F_{St}(s_{ST}) + F_{B.1}(s_{ST}) + 2F_{B.2/3}(s_{ST}) \quad (2.6)$$

Vorgaben für

- die Geometrie und Temperaturen der Arbeitsorgane und
- die mechanischen Eigenschaften des Ziehmaterials

können als Eingangsdaten für das Modell betrachtet werden. Konkret können vor allem die Prozessparameter

- Temperaturen an den Arbeitsorganen (daraus Temperatursumme E und Temperaturdifferenz ΔT) und
- Faltenhalterkraft F_{FH}

variiert werden.

2.3 Entwicklung einer grafischen Benutzeroberfläche

2.3.1 Einführung in die Mensch-Computer-Interaktion

Mensch-Maschine-Systeme (MMS), welche durch das Zusammenwirken bzw. das Interagieren eines oder mehrerer Menschen mit einem technischen System gekennzeichnet werden [11], sind heutzutage vor allem von großer Bedeutung für die Interaktion des Menschen mit computergestützten technischen Systemen, wobei dadurch insbesondere die Bedienung und der Umgang mit Software in den Vordergrund getreten sind. So erläutert BUTZ in [12], dass die meisten technischen Geräte, sprich Maschinen, mittlerweile auf Basis von Computertechnologien arbeiten, wodurch die Bezeichnung Mensch-Computer-Interaktion (MCI) gleichbedeutend für MMS bzw. Mensch-Maschine-Interaktion (MMI) angenommen werden kann.

Die Interaktion erfolgt dementsprechend über die Schnittstelle zwischen Mensch und Maschine, für welche in der VDI/VDE-Richtlinie 3850 [13] die Begrifflichkeit Benutzerschnittstelle, als Zusammenfassung aller Komponenten einer technischen Anlage, die der Interaktion mit Nutzern dienen und von diesen wahrnehmbar sind, eingeführt wird. Oft spricht man dabei auch von GUI bzw. Graphischen Benutzerschnittstellen, wenn die Interaktion durch grafische Anzeigen und grafische Elemente auf einem Computer unterstützt wird. Bestandteil dieser Interaktion ist laut JOHANNSEN [11] die Handlung des Menschen aufgrund bestimmter Eingabe- und Umgebungs-, sowie rückmeldender Ergebnisgrößen, sodass letztlich durch das zielgerichtete Zusammenwirken bestimmte Arbeitsergebnisse bestmöglich erreicht werden können. Die notwendigen Informationen werden direkt über die Außenansicht, beispielsweise des Ablauf eines spezifischen Prozesses, oder indirekt über Anzeigen ermittelt. JOHANNSEN spricht hierbei von der direkten und indirekten sensorischen Kontrolle. Anzeige- und Bedienelemente sollten also in einer bestimmten Weise angeordnet werden, sodass eine vorteilhafte MCI ermöglicht wird. Weiteres dazu kann einem späteren Abschnitt entnommen werden (Kapitel 2.3.4 auf S. 25).

Grundlegend haben drei unterschiedliche Fachgebiete Anteil an Mensch-Maschine-Systemen. Neben der System- und Softwaretechnik wird der Teilbereich des Menschen durch die kognitiven Wissenschaften und die Ergonomie vertreten. Nachfolgend sind nach JOHANNSEN die Bereiche und ihre Inhalte dargestellt (Abbildung 2.11):



Abbildung 2.11: Kennzeichnung des Fachgebietes der Mensch-Maschine-Systeme durch die Überschneidung von drei Methodenbereichen - bezogen auf Mensch, System und Software aus [11]

Allgemein existieren, betreffend der Gestaltung solcher MMS, verschiedene Empfehlungen. Die VDI 3699 [14] bündelt entsprechend 10 Grundsätze, durch die besonders deutlich wird, dass stets der Mensch im Mittelpunkt der Interaktion stehen sollte. Speziell beim Umgang mit Software werden hohe Anforderungen an die Bedienung hinsichtlich der Benutzbarkeit, Zufriedenheit und Attraktivität gestellt [15]. Infolge dessen, sind vor allem durch diese Zentrierung auf den Menschen selbst, neue Teildisziplinen wie beispielsweise die Software-Ergonomie entstanden. BALZERT [16] führt diesen Begriff als Überschneidung der Fachgebiete der Softwaretechnik und Ergonomie ein.

Die Disziplin der Software-Ergonomie stellt somit laut PREIM [15] sicher, dass schon in der Konzeptionsphase der Mensch und seine auszuübenden Tätigkeiten berücksichtigt werden. Ergebnis sollte schlussendlich eine aufgabenangemessene, nützliche und gut nutzbare Software sein, die somit Bedienungsfehler minimiert und auch für nicht versierte Nutzer schnell erlern- und anwendbar ist.

2.3.2 Phasen der Entwicklung

Zur Umsetzung und Gestaltung einer MMS haben sich verschiedene Herangehensweisen entwickelt. SCHMIDT geht in seiner Arbeit [17] besonders auf eine Methodik von UPTON und DOHERTY [18], welche in eine Analyse- und Designphase unterteilt wird, ein. Er verwendete sie zur Findung und Auswahl von Darstellungsmöglichkeiten von Prozessdaten zum Vergleich von Fehlerfällen beim Tiefziehen von Karton und Pappe, vor allem aufgrund der umfangreich beschriebenen Vorgehensweise und der Darbietung verschiedener Entscheidungshilfen.

Im speziellen Fall liegt jedoch bereits eine eindeutig vorgegebene Darstellungsvariante des Tiefziehprozesses (Kapitel 2.3.4, Seite 25) vor, die nun noch konkret umgesetzt und im Detail angepasst werden soll. Folglich sind vor allem die Phasen der Entwicklung einer konkreten Benutzerschnittstelle bzw. eines interaktiven Systems von Interesse, insbesondere unter Berücksichtigung der aus dem Bereich der Software-Ergonomie gestellten Anforderungen.

PREIM [15] unterteilt allgemein in die folgenden Entwicklungsphasen zur Erstellung interaktiver Systeme:

- Analyse
- Anforderungen
- Spezifikationen und Design
- Umsetzung der entworfenen Lösungen

Trotz abgetrennter Phasen findet kein hierarchisches Abarbeiten dieser statt. Denn der eigentliche Gestaltungsprozess ist iterativer Natur. So können während der Entwicklung neue relevante Ziele auftreten, die zum Verwerfen ganzer Zwischenlösungen führen.

Eine ähnliche Unterteilung findet sich in der VDI 3699 [14] und DIN EN ISO 9241-210 [19] wieder. Auch hier sind vier Phasen vorhanden (Nummern 1-4 in Abbildung 2.12).

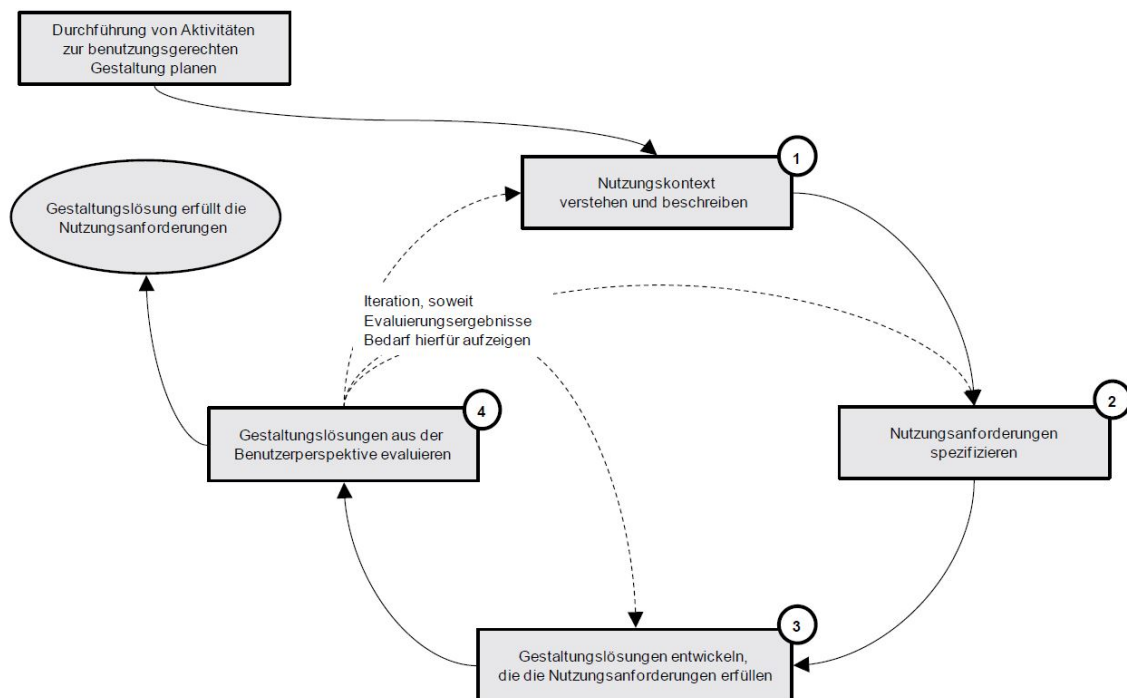


Abbildung 2.12: Aktivitäten zur benutzungsgerechten Gestaltung aus [13]

Die erste Phase entspricht hier der Analysephase. Demzufolge sind Aufgaben, sowie Benutzer und ihre Ziele, Wünsche und Präferenzen zu untersuchen [15]. Im Ergebnis liegt eine Nutzungskontextbeschreibung, in der zu erzielende Arbeitsergebnisse und entsprechende Benutzergruppenbeschreibungen enthalten sind, vor. In der erwähnten VDI-Richtlinie sind jeweils entsprechende Hinweise zur Durchführung angegeben.

Folgend werden in der zweiten Phase, sprich der Anforderungsphase nach PREIM, die Nutzungsanforderungen spezifiziert. Sie werden zunächst aus der vorangegangenen Analyse abgeleitet. Zudem finden zusätzliche Wünsche von Auftraggebern, spezifische Bedürfnisse der Benutzer und technische Realisierungsmöglichkeiten Berücksichtigung. [15] Maßnahmen zur Durchführung können auch hier der VDI-Richtlinie entnommen werden.

Nachdem nun ein Bericht, über die identifizierten Erfordernisse und somit die Spezifikation der Nutzungsanforderungen vorliegt [13], kann zur dritten Phase, der Spezifikations- und Designphase nach PREIM übergegangen werden. Hierbei werden geeignete Lösungen für die Benutzerschnittstelle entworfen und anschließend evaluiert. Das heißt die nun existierenden Lösungen werden systematisch erprobt und Feedback von Nutzern und/oder Experten wird gezielt eingeholt. Diese entsprechende Phase wird in der VDI-Richtlinie als zusätzliche, abgetrennte Phase (gekennzeichnet mit 4 in Abbildung 2.12) dargestellt.

Abschließend wird nach PREIM in der vierten Phase die Vorzugslösung praktisch umgesetzt. In der VDI folgt dieser Schritt entsprechend nach der vierten Evaluierungsphase. Zur Umsetzung von Entwürfen und der letztlichen Vorzugslösungen sollten bestimmte Prinzipien und Gestaltungsanforderungen berücksichtigt werden. Diese sollen folgend in den Kapiteln 2.3.3 und 2.3.4 dargelegt werden.

2.3.3 Dialoggestaltung

Die Interaktion in einem MMS zwischen einem Nutzer und einer technischen Anlage bzw. einem Computer in Form einer Abfolge von Handlungen des Nutzers (Eingaben) und den resultierenden Zustandsänderungen der Anlage (Ausgabe), um ein definierte Arbeitsziel zu erreichen, wird auch als Dialog bezeichnet [13].

Wie zuvor in Kapitel 2.3.2 erwähnt, sollten bei der Gestaltung des Dialoges bestimmte Prinzipien Berücksichtigung finden. Eine entsprechende Auflistung dieser kann der DIN EN ISO 9241-110 [20] entnommen werden. Folgend ist eine kurze Zusammenfassung dieser Prinzipien dargestellt:

- Aufgabenangemessenheit
- Selbstbeschreibungsfähigkeit
- Erwartungskonformität
- Lernförderlichkeit
- Steuerbarkeit
- Fehlertoleranz
- Individualisierbarkeit

Ein umfangreichere Beschreibung der einzelnen Begriffe findet sich im Anhang A.

Durch bestmögliche Einhaltung der Prinzipien können Nutzungsprobleme bei der Dialogführung minimiert werden. So gelangt der Nutzer schnell und auf direktem Weg zu dem erwünschten Arbeitsergebnis.

Der Dialog wird durch verschiedene Dialogtechniken, die den Nutzer in die Lage versetzen erforderliche Auswahlmöglichkeiten zu treffen und Eingaben zu tätigen, realisiert. So kann die Führung eines Dialoges mittels

- Menüs (DIN EN ISO 9241-14),
- Kommandosprache (DIN EN ISO 9241-15),
- direkter Manipulation (DIN EN ISO 9241-16),
- Formulardialoge (DIN EN ISO 9241-143 [21]) und
- in natürlicher Sprache

erfolgen [20], [13].

Für die vorliegende Arbeit ist vor allem die Dialogführung mit Formulardialogen von Bedeutung. Sie soll daher folgend näher beleuchtet werden. Beschreibungen und Hinweise betreffend der übrigen Dialogtechniken, sind den DIN-Normen (die jeweils in der Klammer hinter dem Begriff angegeben sind) zu entnehmen.

Formulardialoge dienen der Bewältigung strukturierter und dateneingabebezogener Arbeitsaufgaben bei denen eine Eingabe bzw. Modifizierung von mehreren Datenelementen erforderlich wird [21]. Konkret auf technische Systeme bezogen, werden demnach durch Parametereingabe und -veränderung, durchgeführt vom Nutzer, konkrete Aktionen an der Anlage hervorgerufen. Die Schnittstelle eines Formulardialogs ist gekennzeichnet durch die Anordnung verschiedener Eingabefelder, Auswahlmöglichkeiten und Buttons [13]. Einige dieser sogenannten Dialogbausteine sind in Abbildung 2.13 beispielhaft dargestellt.

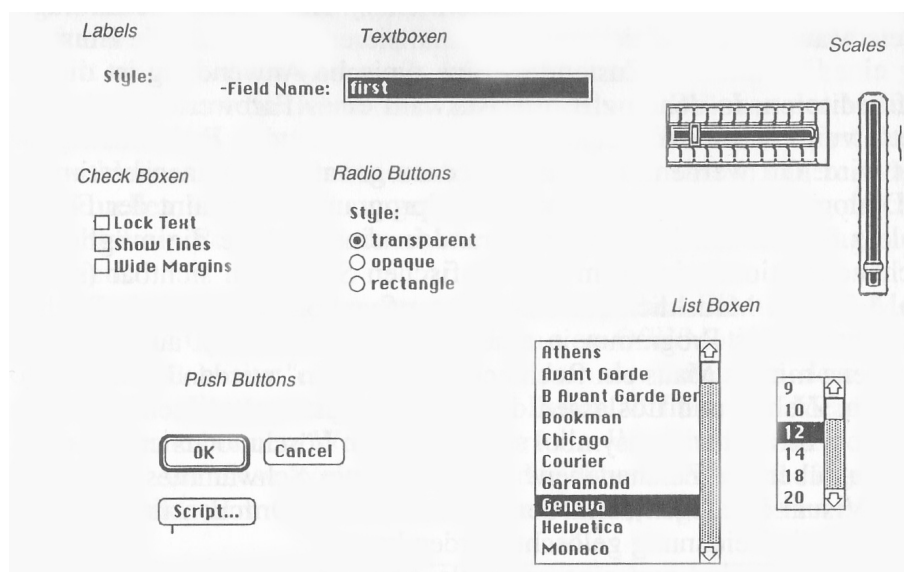


Abbildung 2.13: Basiselemente: Label, Textfeld, Pushbuttons, Checkboxen, Radiobuttons, analoge Anzeiger (Scales) und Listboxen [22]

Besonderes Augenmerk liegt jedoch auf Dialogbausteinen, die der numerischen Werteingabe dienen. Die nachfolgend erstellte Darstellung (Tabelle 2.3.3) soll einen Überblick über entsprechende Grundelemente gewähren. Jedoch sollten vor der Auswahl und Kombination geeigneter Dialogbausteine stets zuvor einige grundlegende Fragen geklärt werden [15]:

- Welche Eingaben sind notwendig und welche sind optional?
- Stehen bestimmte Eingaben in einem Zusammenhang? Existieren Abhängigkeiten zwischen den Eingaben?
- Welche Wertebereiche sind bei der numerischen Eingabe zu beachten?
- Welche Anforderungen an die Genauigkeit bestehen? Sollen die Werte kontinuierlich oder diskret eingebbar sein?

Tabelle 2.3: Übersicht von Dialogbausteinen für die numerische Eingabe von Werten

Dialogbaustein	Erklärung und Hinweise
(Text-)Felder, Edits	Die Eingabe des Wertes erfolgt in ein dafür vorgesehenes editierbares Textfeld. Der zulässige Wertebereich muss dabei klar erkennbar sein. Zudem ist das Feld eindeutig zu beschriften. Entsprechend der Größe sollten bei Bedarf in dieser Beschriftung Angaben zur Maßeinheit der Größe gemacht werden. Gegebenfalls ist auch ein Umschalten zwischen verschiedenen Maßeinheiten sinnvoll [15]. Die direkte Eingabe ermöglicht ein sehr genaues Festlegen des entsprechenden numerischen Wertes.
Arrow Buttons	Arrow Buttons sind Knöpfe mit aufgetragenen Pfeilen nach oben und unten. Neben dem Textfeld angeordnet, ermöglichen sie es, den numerischen Wert diskret mit einer definierten Schrittweite zu verändern. Diese muss dabei in einem günstigen Verhältnis zum eingebbaren Wertebereich stehen. Denkbar ist darüber hinaus eine Erhöhung der Geschwindigkeit, bei Steigerung bzw. Verringerung des Wertes, während eines längeren Gedrückthaltens des Arrow-Buttons, zur Überbrückung längerer Intervalle im Wertebereich. Die direkte Texteingabe oder folgend beschriebene Manipulation mit Slidern ist bei extremen Veränderungen im Wertebereich allerdings vorzuziehen [15].

Slider, Schieberegler, Scales	Slider bzw. Schieberegler (oder auch analoge Formularelemente) ermöglichen über das Verschieben einer Skala eine direkt-manipulative Grobeinstellung des Wertes in einem kontinuierlichen Wertebereich [15]. Von Vorteil ist zudem, dass der Wertebereich anhand der Skalenlänge leicht abgeschätzt werden kann. In der DIN EN ISO 9241-161 [23] ist der grundlegende Aufbau mit den Komponenten (a...Beschriftung, b....Mittel zum Ändern von Daten in zwei Richtungen, c...Ausgabe des aktuellen Wertes der Daten in Prozent oder mit Skalenmarkierungen) eines Sliders dargestellt (Abbildung 2.14).
-------------------------------	---

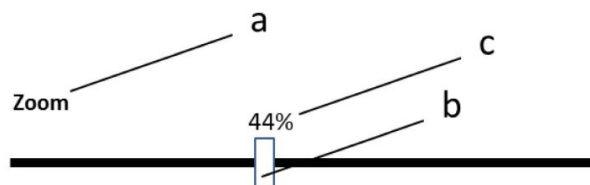


Abbildung 2.14: Beispiel für ein analoges Formularelement (Schieberegler), bei dem ein Ziehpunkt entlang einer als Balken dargestellten horizontalen Achse bewegt wird, um einen in Prozent dargestellten Wert zu erhöhen oder zu verringern aus [23]

Eine Kombination aller vorgestellten Dialogbausteine zeigt Abbildung 2.15. Eine Veränderung des numerischen Wertes über eine der drei Eingabemöglichkeiten sorgt hierbei für eine Veränderung des Wertes in allen Bausteinen. Wird zum Beispiel der Wert über die Arrow-Buttons manipuliert, so sollte er sich entsprechend im Textfeld und im Slider mit der Reglerstellung automatisch anpassen. Diese Abhängigkeit ist bei der Kombination zwingend [15].

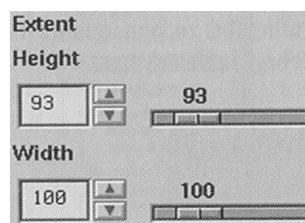


Abbildung 2.15: Beispiel für die Kombination verschiedener Varianten der Eingabe numerischer Werte aus [15]

Die aufgezeigte Kombination ist nicht immer sinnvoll. Für spezielle numerische Eingaben haben sich einige zusätzliche Eingabemethoden, die dennoch aus den Grundelementen aufgebaut sind, entwickelt.

Für die Eingabe von Winkelwerten sind besonders sogenannte kreisrunde Dial-Widgets (Abbildung 2.16) geeignet. Die Winkeleingabe erfolgt durch Festlegung einer Richtung. Positiv hervorzuheben ist, die hervorragende Abbildung der Bedienhandlung auf die Reaktion [15]. Eine intuitive Bedienung wird somit ermöglicht.

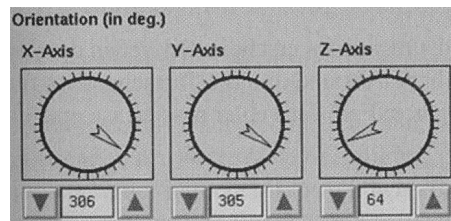


Abbildung 2.16: beispielhafte Darstellung eines Dial-Widgets aus [15]

Die Kombination zweier ineinander integrierter Slider wird als Double bzw. Range Slider (Abbildung 2.17) bezeichnet. Sie eignen sich speziell für die Eingabe von Intervallen. Sie sind so gestaltet, dass deren Bedienreihenfolge stets vorgegeben ist [15]. So kann der Nutzer nicht fälschlicherweise einen Wert für eine Intervallobergrenze eingeben der unter der unteren Intervallgrenze liegt. Bei zwei getrennten Slidern zur Intervalleinstellung wäre dieses Szenario durchaus denkbar und würde zu Fehlern führen.

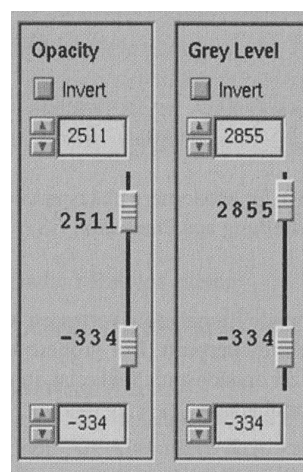


Abbildung 2.17: beispielhafte Darstellung eines Double Slider-Widgets [15]

Eine weitere spezielle Möglichkeit sieht die Kombination der Dialogeingabe und -ausgabe, welche später noch in Kapitel 2.3.4 behandelt werden soll, in Form einer Balkendarstellung mit Grenzbereich und Sollwertsteller vor. Speziell für die Dialogeingabe bei technischen Systemen geeignet, kann der Nutzer hier über ein verschiebbares

Dreieck den für einen spezifischen Prozess, erwünschten Sollwert direkt einstellen. Vorteilhaft ist, dass der entsprechende Stellbereich des Reglers direkt in der Darstellung angezeigt wird. Der Nutzer erhält darüber hinaus die direkte Rückmeldung, aus dem gesteuerten Prozess, durch Anzeige des aktuellen Ist-Wertes. Zur korrekten Einstellung des Sollwertes ist als Hilfestellung außerdem ein tolerierter Bereich für den spezifischen Wert durch einzeln aufgetragene Grenzbereiche abgetrennt. Der Nutzer erfährt zusammenfassend also, in welchem allgemeinen Wertebereich er seine numerische Eingabe tätigen kann und in welchem Bereich dieser Wert idealerweise zu liegen hat. Der grundlegende Aufbau, entsprechend der VDI 3699 ist der nachstehenden Abbildung 2.18 zu entnehmen.

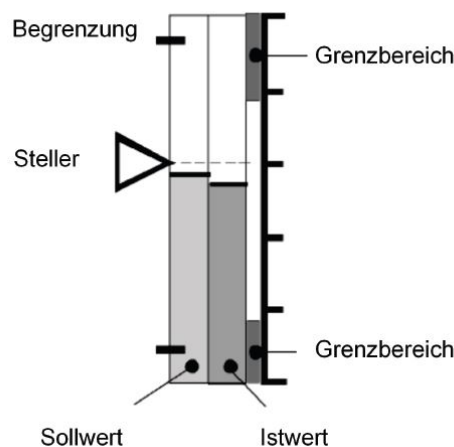


Abbildung 2.18: Beispiel einer Balkendarstellung mit Grenzbereich und Sollwersteller aus [14]

2.3.4 Informationsgestaltung

Die Informationsgestaltung bzw. -visualisierung nimmt einen wichtigen Platz bei der Gestaltung von benutzerfreundlichen Mensch-Maschine-Interaktionen ein. Definiert ist sie nach PREIM [15] als die Nutzung computergenerierter, interaktiver, visueller Repräsentationen von abstrakten, nicht-physikalischen Daten zur Verstärkung des Erkenntnisgewinn des Nutzers. Durch diese Visualisierung der Daten, die bestimmten Vorgängen, Ereignissen oder Sachverhalten zugehörig sind, werden sie für den Nutzer interpretierbar und somit zu, in einem Kontext betrachtbaren, Informationen [24]. Offensichtlich kann demnach der Gewinn von Erkenntnissen und Einsichten, vor allem zum zuverlässigen Treffen von Entscheidungen, nach PREIM als eines der Hauptziele der Informationsgestaltung festgelegt werden. Vorliegende Daten werden aufbereitet und ggf. reduziert. Die Resultate einer solchen Datentransformation werden dann in für die Visualisierung geeignete geometrische Modelle überführt. Schlussendlich erfolgt

die grafische Anzeige der Visualisierung bspw. auf einem Bildschirm.

Um mögliche Fehlinterpretationen der Informationen zu vermeiden und die Aufmerksamkeit des Nutzer auf relevante Informationen zu fokussieren, sind nach DIN EN ISO 9241-110 [20] auch hierbei bestimmte Prinzipien zu beachten:

- Entdeckbarkeit (Erkennbarkeit, Auffälligkeit)
- Lesbarkeit
- Unterscheidbarkeit
- Eindeutigkeit (Klarheit)
- Kompaktheit (Prägnanz)
- Konsistenz
- Zusammengehörigkeit
- Kontinuität

Eine Beschreibung der einzelnen Begrifflichkeiten findet sich im Anhang B wieder.

Die Darstellung relevanter Informationen sollte nun so erfolgen, dass die Prinzipien bestmöglich umgesetzt werden. Grundlegend können Informationen durch sieben verschiedene visuelle Variablen aufgezeigt werden. Nach BERTIN [25] kann die Wahrnehmung der Informationen entweder assoziativ, selektiv, ordnungsfähig oder qualitativ erfolgen. Die Zuordnung der Wahrnehmungsart zu den jeweiligen visuellen Variablen ist in Abbildung 2.19 dargestellt. Entsprechende beispielhafte Erläuterungen sind der Arbeit von SCHMIDT [17] zu entnehmen.









Visual Variable	Type of Perception			
	Associative	Selective	Ordered	Quantitative
 Spatial X	YES	YES	YES	YES
 Spatial Y	YES	YES	YES	YES
 Size		YES	YES	YES
 Brightness		YES	YES	
 Texture	YES	YES	YES	
 Colour	YES	YES		
 Orientation	YES	YES		
 Shape	YES			

Abbildung 2.19: Zuordnung der visuellen Variablen zu den verschiedenen Wahrnehmungsarten [25]

Erfolgsbringend, hinsichtlich der Beachtung der Prinzipien, ist die gezielte Wahl und Kombination der visuellen Variablen zur Informationscodierung. In [26] finden sich entsprechende Hinweise, die bei der Gestaltung der gesamten Informationsvisualisierung

von MMS, als erstrebenswert eingeordnet werden können. Die Gestaltungshinweise beziehen sich vor allem auf die Visualisierung einer MMS für die Steuerung der Prozesse in einem Kraftwerk. Sie sind jedoch auch auf andere technische Systeme übertragbar. Einige zutreffende Anmerkungen sind im Anhang C zusammengefasst.

Eine konkrete Möglichkeit der Aufbereitung und Darstellung von Informationen besteht in der Verwendung von sogenannten Configural Displays. Durch räumliche Trennung, Farbcodierung oder bewusste Zerstörung von Symmetrien in der Darstellung werden Beziehungen, Beschränkungen und Ziele zwischen den repräsentierten Informationen deutlich [27]. In [26] ist beispielhaft das nachstehende Configural Display (Abbildung 2.20) beschrieben.

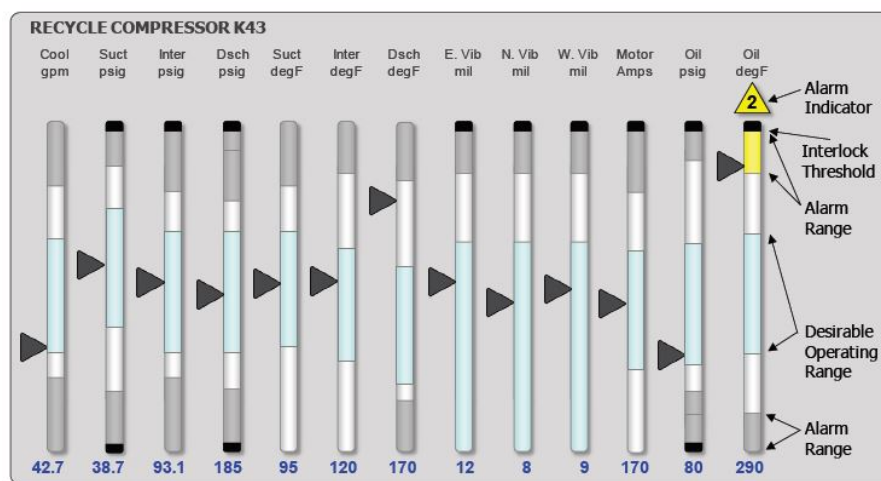


Abbildung 2.20: analoge Darstellung der Prozessdaten eines Kraftwerkes in einem Configural Display aus [26]

Die einzelnen entscheidenden Prozessparameter werden hier durch nebeneinander angeordnete analoge Darstellungen repräsentiert. Analog zu Abbildung 2.18 gibt es auch hier bei jeder Balkendarstellung die Abgrenzung eines gültigen Arbeitsbereiches, so dass der Nutzer schnell erkennt, wenn ein Parameter in einen Grenzbereich kommt und dadurch den gültigen Arbeitsbereich verlässt. Durch die Anordnung erkennt der Nutzer zudem auf einen Blick, wenn sich bei einem Parameter Abweichungen ergeben. So befinden sich bei einem ideal ablaufenden Prozess alle Anzeiger, in Form der dunkelgrauen Dreiecke, im mittleren Bereich der Balken und bilden somit in ihrer Gesamtheit einen horizontalen Verlauf. Eine Abweichung stört dieses Gesamterscheinungsbild entsprechend und springt daher sofort ins Auge. Der Nutzer ist damit in der Lage auf intuitive Weise zu arbeiten. Somit werden kognitive Kapazitäten des Nutzers für andere wichtige Arbeitsaufgaben frei [17].

Für diese Arbeit ist es von entscheidender Bedeutung die Prozessdaten aus dem Tiefziehprozess von Papier und Karton geeignet darzustellen, um schnell erkennen zu können, ob ein gutes Ziehergebnis in Form eines qualitätsgerechten Ziehformteils hervorgerufen wird. Die bisherigen Ausführungen in diesem Kapitel sollen dabei Berücksichtigung finden. In der Diplomarbeit von SCHMIDT [17] wurde diese Problemstellung bereits näher untersucht. Daher sollen abschließend einige seiner Arbeitsergebnisse kurz vorgestellt werden. In den Darstellungen werden jeweils die charakteristischen Größen aus dem Stempelkraftverlauf dargestellt. Darüber hinaus vergleicht SCHMIDT in seinen unterschiedlichen Visualisierungen jeweils verschiedene Fehlerfälle. Da in der vorliegenden Arbeit aber ausschließlich ein Vergleich zwischen einem konkreten eingestellten Fall, durch Variation definierter Eingangsparameter, sowie einem Idealfall, für ein qualitätsgerechtes Ziehformteil, thematisiert wird, soll auf Erläuterungen dazu verzichtet werden.

Die erste Möglichkeit der Darstellung von SCHMIDT nutzt ein Netz- bzw. Spinnendiagramm (Abbildung 2.21) zur Visualisierung. An den sich in einem Mittelpunkt treffenden Achsen sind die einzelnen charakteristischen Größen angetragen. Durch Verbinden der speziellen Werte ergibt sich eine schnell zu überblickende Darstellung. Auch können hier verschiedene eingezeichnete Fälle für unterschiedlich eingestellte Eingangsparameter schnell verglichen werden [17]. Daher soll diese Variante auch die Grundlage zur Erstellung der Informationsvisualisierung der charakteristischen Größen in dieser Arbeit bilden.

Darüber hinaus entwarf SCHMIDT die Darstellungen für die charakteristischen Größen aus dem Stempelkraftverlauf mittels

- Listenansicht (Abbildung 2.22),
- Zeigerdarstellung (Abbildung 2.23) und
- zweiachsiger Diagrammdarstellung (Abbildung 2.24).

Nähere Beschreibungen und ein Vergleich, über die binäre Methodik, der einzelnen Varianten können der Arbeit von SCHMIDT [17] entnommen werden.

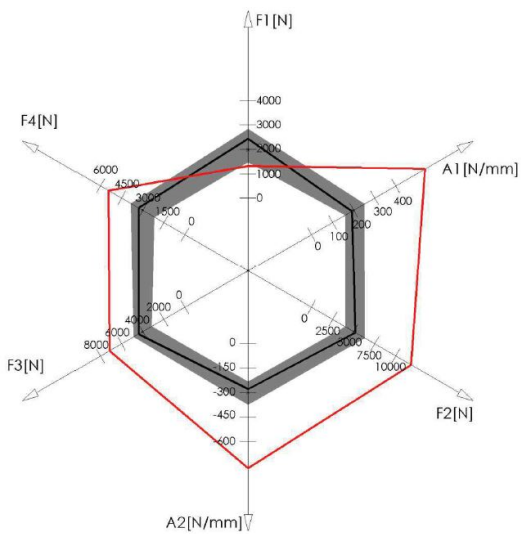


Abbildung 2.21: Darstellung mittels Netzdiagramm mit Toleranzbereich (grau), Sollwert (schwarz) und konkretem Fall (rot) aus [17]

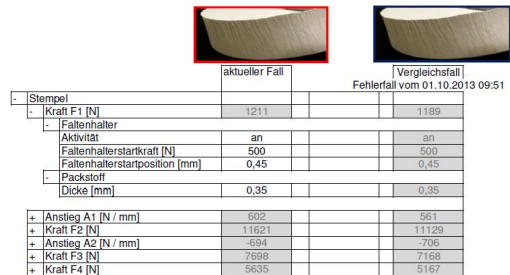


Abbildung 2.22: Darstellung mittels Liste mit dem Vergleich zweier Fälle aus [17]

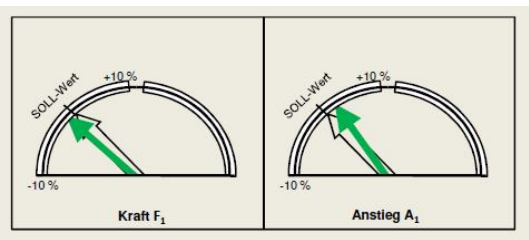


Abbildung 2.23: Darstellung mittels Zeiger mit Soll-Wert und konkretem Fall (grün) aus [17]

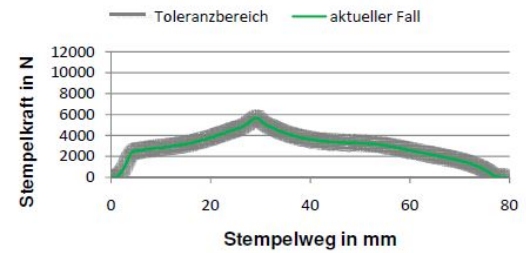


Abbildung 2.24: Darstellung mittels zweiachsigem Diagramm mit Toleranzbereich (grau) und konkretem Fall (grün) aus [17]

2.4 Zusammenfassung

Das Verfahren des Tiefziehens von Papier und Karton, als mehrdimensionaler Umformprozess, unterscheidet sich in eine offene und geschlossene Prozessvariante. Gemein ist beiden Varianten die Erzeugung des Umformteiles durch das gezielte Zusammenwirken der beheizten Ziehwerkzeuge Stempel und Ziehbüchse. Das entsprechend hergestellte Ziehformteil lässt sich hinsichtlich seiner Qualität durch verschiedene Kennwerte und Kenngrößen unterscheiden. Das Verfahren und somit die Qualität der Produkte hängen von einer Vielzahl von Einflussfaktoren ab. Ein Teil dieser Einflüsse lässt sich auch im Stempelkraftverlauf des Prozesses wiedererkennen. Er kann darüber hinaus so auch der Vorhersage der Formteilqualität dienen und eignet sich daher als Grundlage des Modells einer Prozesssimulation. HAUPTMANN führte ein solches Modell des Stempelkraftverlaufes, welches die Variation der Faltenhalterkraft und der Ziehwerkzeugtemperaturen erlaubt, ein. Dieses bildet die Grundlage für die Realisierung der GUI.

Zur Erstellung einer interaktiven Benutzerschnittstelle ist eine grundlegende Analyse der Benutzer und der ihrer Arbeitsziele nötig. Daraus abgeleitete Anforderungen bilden die Grundlage für den Entwurf und die spätere technische Umsetzung geeigneter Lösungen. Entsprechende Lösungen sind, vor allem durch den Nutzer selbst, zu evaluieren. Der umrissene Entwicklungsprozess ist iterativ und wird bei Bedarf mehrfach abgearbeitet. Entscheidend für die erfolgreiche Gestaltung einer Benutzerschnittstelle im MMS ist die Art der Darstellung von Eingabedialogen und repräsentierten Informationen. Bei der Eingabe numerischer Werte ist insbesondere die Darstellung des Wertebereichs und die Art der Eingabe, ob diskret oder kontinuierlich, zu beachten. Die Grundelemente *Felder*, *Arrow-Buttons*, *Slider* können gezielt kombiniert werden, um schnell und auf direktem Weg zu erwünschten Arbeitsergebnissen zu gelangen. So stehen beispielsweise spezielle Eingabemethoden, wie *Dial-Widgets* und *Range-Slider* zur Verfügung. Auch die direkte Kombination aus Dialog- und Informationsdarstellung kann Verwendung finden. Die Informationsdarstellung selbst nimmt eine wichtige Rolle bei der Repräsentation von Daten, beispielsweise aus einem Prozess ein. Diese Daten können geeignet durch die Kombination sieben verschiedener visueller Variablen verschlüsselt werden. Hervorzuheben ist die Verwendung von *Configural Displays*. Sie gelten als besonders benutzerfreundliche und effektive Darstellungsart von Prozessdaten. SCHMIDT [17] untersuchte in seiner Diplomarbeit konkrete Darstellungsmöglichkeiten für die Visualisierung charakteristischer Kenngrößen aus dem Stempelkraftverlauf. So entwickelte er ein *Netzdiagramm*, welches im Fortlauf zur Erstellung der graphischen Benutzerschnittstelle für den Tiefziehprozess, aufgrund seiner Vorteile beim Vergleich von unterschiedlichen Fällen, ausgewählt wurde.

3 Präzisierte Aufgabenstellung

Die eingangs gestellte Aufgabe beinhaltet im Wesentlichen die Entwicklung einer interaktiven graphischen Benutzeroberfläche zur Erprobung von Wechselwirkungen zwischen verschiedenen Prozessparametern beim Tiefziehen von faserbasierten Materialien, wie Papier und Karton.

Dabei sind als Eingabegrößen Betriebsparameter auszuwählen, die Einfluss auf den Verlauf des Prozesses sowie sein Ergebnis haben und somit auch die Qualität des produzierten Ziehformteils beeinflussen. Hierbei muss die Art der Parametereingabe berücksichtigt werden. Die entsprechenden Voruntersuchungen aus Kapitel 2.3.3 ab Seite 20 sind dabei zu nutzen, sodass die Eingaben flexibel anpassbar sind und je nach Bedarf diskret oder kontinuierlich vorgenommen werden können. Darüber hinaus soll eine Sperrung bestimmter Parametereingaben für spezifische Nutzergruppen in der GUI ermöglicht werden. Eine entsprechende Analyse von Nutzergruppen ist dazu anzufertigen.

Die resultierenden Ausgangsgrößen innerhalb der GUI sollen so dargestellt werden, dass schnell Aussagen über die Qualität produzierter Ziehformteile getroffen werden können. Entsprechend der Erkenntnisse aus dem Kapitel 2.3.4 ab Seite 25 ist eine Darstellung in einem Netzdiagramm mit Absolutwerten zu bevorzugen. Zudem sollte der Darstellung ein Vergleich des konkreten Ziehformteils, das sich aus der Eingabe der spezifischen Betriebsparameter ergibt, mit einem qualitätsgerechten Referenzziehformteil entnehmbar sein. Der um dieses ideale Referenzteil liegende Toleranzbereich für ein qualitätsgerechtes Ziehformteil ist über die GUI einstellbar zu gestalten.

Zur Umsetzung ist ein geeignetes Programmierwerkzeug auszuwählen, sodass später die Kommunikation mit der tatsächlichen Prozesssteuerung am Tiefziehversuchsstand realisiert werden kann. So soll es ermöglicht werden, Prozessdaten aus einem Versuchsaufbau zum Tiefziehen in die Anwendung einzuspielen. Außerdem ist bei der programmier-technischen Umsetzung darauf acht zu geben, dass zu einem späteren Zeitpunkt leicht Änderungen am enthaltenen Prozessmodell für das Tiefziehen vorgenommen werden können.

4 Zielstellung und Lösungsweg

Die Zielstellung der vorliegenden Arbeit ist die Entwicklung und Umsetzung der GUI entsprechend der präzisierten Aufgabenstellung (Kapitel 3, Seite 31).

Nach der vorangegangenen Recherche zum Stand von Wissenschaft und Technik (Kapitel 2, Seite 2) wird nun zunächst eine knappe Analyse der Nutzergruppen durchgeführt. Resultierend wird eine Nutzerkontextbeschreibung vorliegen, die die Beschreibung von Nutzergruppen und zu erzielenden Arbeitsaufgaben der jeweiligen Nutzer enthält.

Es folgt eine detaillierte Analyse des Modells für den Stempelkraftverlauf nach HAUPTMANN hinsichtlich der einzugebenden und auszugebenden Parameter. Geeignete Eingabemethoden werden bereits hier dargelegt. Auch wird hierbei auf die konkrete Darstellung der Ausgangsparameter und des Referenzvergleiches im Netzdiagramm eingegangen.

Schlussendlich werden alle Anforderungen, die an die GUI gestellt werden und aus den vorherigen Analysen geschlussfolgert werden können, in einer Listendarstellung zusammengefasst.

Im Anschluss erfolgt die programmiertechnische Umsetzung. Nach der Auswahl eines geeigneten Programmierwerkzeuges wird eine erste Benutzeroberfläche, zur Erzeugung des Netzdiagramms mit direkter Einstellung der charakteristischen Größen aus dem Stempelkraftverlauf, programmiert. Auf diesen Zwischenschritt folgt die Umsetzung der eigentlichen GUI. Es werden jeweils Erläuterungen zum Aufbau der Oberfläche und Programmstruktur dokumentiert.

5 Erarbeitung von Anforderungen an die graphische Benutzeroberfläche

5.1 Nutzerkontextbeschreibung

Nach [13] ist das Ziel der Nutzerkontextbeschreibung, die verschiedenen Nutzer und ihre Aufgaben im realen Arbeitsumfeld zu identifizieren. Sie schließt demnach primär die Qualifikation der Nutzer selbst, die zu erledigenden Arbeitsaufgaben, Arbeitsmittel, die bei der Erledigung zum Einsatz kommen, sowie die physische Umgebung und die Zusammenarbeit mit anderen Personen ein.

Im weiteren Verlauf soll eine solche Nutzerkontextbeschreibung knapp durchgeführt werden, sodass im Anschluss konkrete Anforderungen, die an die GUI gestellt werden können, ableitbar sind. Hierbei ist insbesondere die Beschreibung der Nutzer, ihrer Qualifikationen, sowie die Beschreibung der jeweils von ihnen zu erledigenden Arbeitsaufgaben, von Interesse. Die Analyse ist in Tabelle 5.1 zusammengefasst.

Tabelle 5.1: Nutzerkontextbeschreibung

	Experte	Novize
Beschreibung und Qualifikation	Nutzer ist mit dem Tiefziehprozess vertraut, kennt zahlreiche Einflussfaktoren von denen Prozess und Stempelkraftverlauf abhängt	Nutzer ist nur oberflächlich mit dem Prozess vertraut, kennt nur wenige Einflussfaktoren von denen Prozess und Stempelkraftverlauf abhängt
	Nutzer kann daher auch Informationen aus dem Stempelkraftverlauf ablesen	Nutzer kann aus der bloßen Darstellung des Stempelkraftverlaufes keine Informationen über die Qualität der Ziehteile gewinnen
	Nutzer ist umfangreich mit der Bedienung des spezifischen Versuchsstandes der TU-Dresden vertraut	Nutzer ist nur über die Bedienung einfacher Funktionen am Versuchsstand vertraut (nach Durchführung einer kurzen Einführung)

	z.B. Mitglieder aus dem Arbeitskreis für das Tiefziehen von Papier und Karton, Studenten des Verarbeitungsmaschinenbaus, die entsprechende Praktika am Tiefziehversuchsstand innerhalb ihres Studiums absolviert haben	z.B. Studenten und Mitarbeiter der Psychologie und Prozessleittechnik, die innerhalb des CBR-Kolloquiums mitarbeiten, z.B. außenstehende Versuchspersonen, die nur eine kurze Einführung in das Tiefziehen und den zugehörigen Versuchsstand erhalten haben
zu erledigende Arbeitsaufgaben	<p>Erprobung des Einflusses aller möglich einstellbaren Betriebsparameter auf die Qualität des Ziehteiles</p> <hr/> <p>Sperrung gewisser einstellbarer Parameter für den Novizen</p> <hr/> <p>Zuweisung eines Toleranzbereiches für jede Kenngröße des Stempelkraftverlaufs für ein qualitätsgerechtes Ziehteil, sowie Einstellung von Optima der Kenngrößen und Achsintervallen im Netzdiagramm</p>	Erprobung des Einflusses aller freigegebenen Betriebsparameter auf die Qualität des Ziehteiles

5.2 Analyse einzugebender Parameter

Nach der Erstellung der Nutzerkontextbeschreibung wird nun eine Analyse der Parameter, welche als Eingangsgrößen für das Modell des Stempelkraftverlaufes (Kapitel 2.2, Seite 11) benötigt werden, durchgeführt. Dabei sind auch die von HAUPTMANN aufgestellten Modellgrenzen zu berücksichtigen. Darüber hinaus werden zudem Eingabeparameter erfasst, die später für die Darstellung im Netzdiagramm notwendig sind. Sollte der jeweilige Parameter variierbar sein, so wird gleichzeitig aufgezeigt für welche Nutzergruppe und wodurch er einstellbar gemacht werden sollte. Die Zusammenstellung findet sich in Tabelle 5.2 wieder.

Tabelle 5.2: Aufstellung aller notwendigen Eingabeparameter für die GUI

Kategorie	Parameter	editierbar für	editierbar über	Wert bzw. Wertebereich
notwendige Eingabeparameter für die Modellierung des Stempelkraftverlaufes				
Material	d_{Mat} Materialdicke	-	-	0.70 mm
Form und Format	h_{ZT} Ziehhöhe	Exp, Nov optional	Edit	25 mm
	r_{ZT} Radius der Formteilgrundfläche (zylindrisches Formteil)	Exp, Nov optional	Edit	55 mm
Arbeitsorgane	h_{ZB} Höhe der Ziehbüchse	Exp, Nov optional	Edit	50 mm
	D_{ZB} Durchmesser Ziehbüchse	Exp, Nov optional	Edit	110 mm
	r_{ZB} Radius Ziehbüchse	Exp, Nov optional	Edit	3.0 mm
	r_{ST} Radius Stempel	Exp, No optional	Edit	0.2 mm
	α_l Koeffizient für thermische Längenänderung bei Stempel und Ziehbüchse (abhängig vom Material)	Exp, Nov optional	Edit	$11.7 * 10^{-6}$
	μ_{ZB} Reibkoeffizient Ziehbüchse	Exp, Nov optional	Edit	0.129
Prozess	μ_{FH} Reibkoeffizient Faltenhalter	Exp, Nov optional	Edit	0.125
	F_{FH} Faltenhalterkraft (konstant oder linear)	Exp, Nov	Edit, Slider	500 - 2000 N
	T_{ST} Temperatur Stempel	Exp, Nov	Edit, Slider	70 °C - 250 °C
	Temperatur Ziehbüchse T_{ZB}	Exp, Nov	Edit, Slider	70 °C - 250 °C
	E Temperatursumme			200 K - 400 K

	ΔT Temperaturdifferenz			0 K - 100 K
Weiteres	T_U Umgebungstemperatur	Exp, Nov	Edit, Slider	15 °C - 25 °C
	α Umschlingungswinkel	-	Programmcode	90 °
	b_{Pr} Probenbreite	-	Programmcode	15 mm
	A_{Pr} Probenfläche	-	Programmcode	150 mm ²
notwendige Eingabeparameter für die Darstellung im Netzdiagramm				
	$F_{1opt}, F_{2opt}, F_{3opt}, F_{4opt}, A_{1opt}$ und A_{2opt} Optima für die charakteristischen Kennwerte des Stempelkraftverlaufes für ein qualitätsgerechtes Ziehteil	Exp	Edit	
	$F_{1tol}, F_{2tol}, F_{3tol}, F_{4tol}, A_{1tol}$ und A_{2tol} Toleranzbereiche für die charakteristischen Kennwerte des Stempelkraftverlaufes für ein qualitätsgerechtes Ziehteil	Exp	Edit	
	$F_{1achs}, F_{2achs}, F_{3achs}, F_{4achs}, A_{1achs}$ und A_{2achs} Achsfaktoren für die Berechnung der Achsintervalle im Netzdiagramm	Exp	Edit	

Die Eingabe und somit die Variation der jeweiligen Optima der Kraft- und Anstiegs-kennwerte des Stempelkraftverlaufes ist vorzusehen, da es dadurch ermöglicht wird eine spezifische Referenz für die Ziehteilqualität je nach Nutzerpräferenz einzustellen. Denn es exestiert nicht das eine ideale Ziehteil mit konkreten festgelegten Kennwerten des Kraftverlaufes. Je nach spezifischen Anforderungen, die an das Ziehformteil gestellt werden, unterscheiden sich die Qualitätskenngrößen des Teiles in ihrer Ausprägung und somit sind auch die Verlaufskennwerte zu differenzieren.

5.3 Darstellung auszugebender Parameter

Ziel der GUI ist die schnelle Identifikation der Qualität eines Ziehformteiles, welches mit den zuvor eingestellten Einflussparametern produziert werden würde. Entsprechend ist eine geeignete Darstellung zu wählen. In dem Kapitel 2.3.4 auf Seite 25 wurden bereits unterschiedliche Möglichkeiten der Darstellung beleuchtet. Schlussendlich soll nun die Darstellung mit Hilfe eines Netzdiagramms erfolgen. Dazu werden die spezifischen Werte der charakteristischen Kenngrößen des Stempelkraftverlaufs auf den einzelnen Achsen aufgetragen. Mit Hilfe des Verbindens dieser ergibt sich ein Hexagon. Durch die Gegenüberstellung mit den verbundenen Kennwerten eines qualitätsgerechten Referenzziehteils wird es dem Nutzer möglich, schnell eine Aussage über die Qualität seines eingestellten Ziehteiles zu machen. Liegt der erzeugte Graph der Darstellung innerhalb eines definierten Toleranzbereiches um die Referenz, so färbt sich dieser grün (Abbildung 5.2). Andernfalls, bei Lage außerhalb dieses Bereiches, ist der Graph der Darstellung rot visualisiert (Abbildung 5.1). Durch diese Farbcodierung- und unterscheidung wird die Identifikation der Qualität beschleunigt. Der Toleranzbereich selbst wird durch separate Linien im Diagramm angezeigt. Darüber hinaus wird der Graph des Referenzziehteils als gleichseitiges Hexagon in das Netzdiagramm eingetragen. Ein eingestelltes qualitätsgerechtes Ziehteil weist demnach ebenso eine solche gleichmäßige und für den Nutzer rasch zu erkennende Form auf. Das Netzdiagramm wird so ausgelegt, dass es sich stets so automatisch ausrichtet, dass die Gleichseitigkeit des Hexagons umgesetzt wird, auch wenn durch den Nutzer andere Optima für die charakteristischen Kennwerte eingegeben werden.

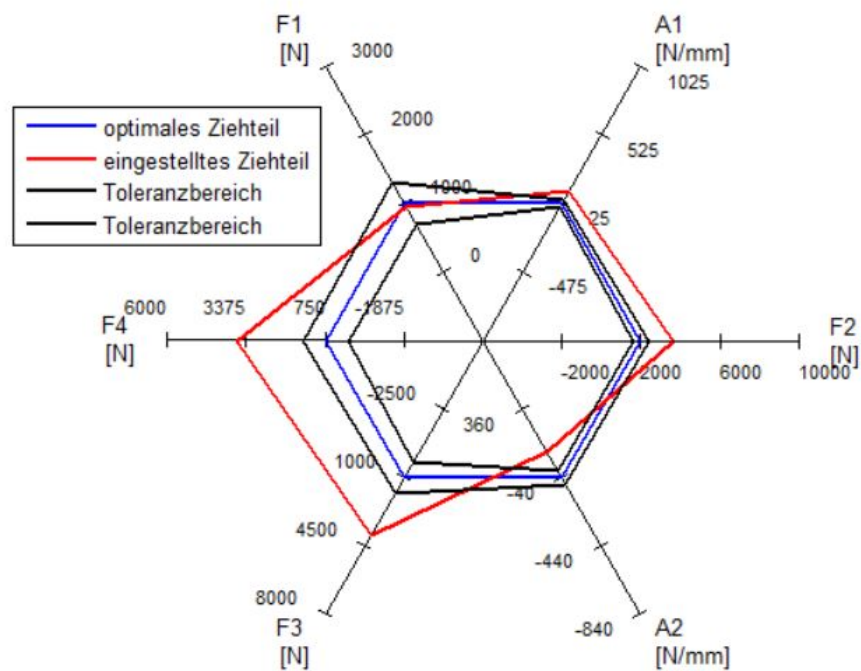


Abbildung 5.1: Gegenüberstellung des Referenzziehteils mit dem konkret eingestellten Ziehteil mit Rotfärbung

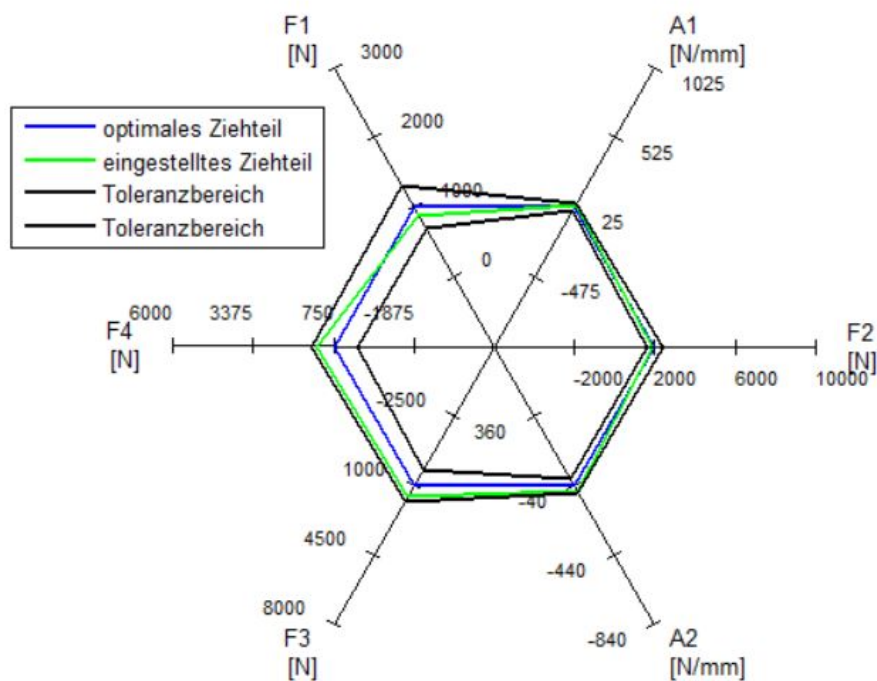


Abbildung 5.2: Gegenüberstellung des Referenzziehteils mit dem konkret eingestellten Ziehteil mit Grünfärbung

5.4 Anforderungsliste

Stellt man einen Zusammenhang zwischen der Nutzerkontextbeschreibung und den einzugebenden und auszugebenden Parametern der GUI her, so erhält man eine Anforderungsliste. Diese fasst die Rahmenbedingungen für die Entwicklung der graphischen Benutzeroberfläche zusammen und dient der ständigen Orientierung während der programmiertechnischen Umsetzung. Im Anhang E auf Seite XXV ist die Liste in knapper Form dargestellt.

6 Programmiertechnische Umsetzung

6.1 Wahl des Programmierwerkzeuges

Zur programmiertechnischen Umsetzung des Modelles für den Stempelkraftverlauf und der GUI wird die kommerzielle Software *Matlab* in der Version R2013a verwendet. Ein Vorteil von *Matlab* ist das Vorhandensein einer Toolbox (bezeichnet als *Guide*) für die Erstellung einer graphischen Benutzeroberfläche. Sie erlaubt es auch, dem nicht erfahrenen Programmierer, schnell die äußere Form einer GUI zu erstellen. Benötigte Dialogbausteine können simpel per „Drag and Drop“ auf den Arbeitsbereich gezogen und dort beliebig angeordnet werden (Abbildung 6.1). Der zugehörige Programmcode wird daraufhin automatisch generiert, sodass nur die einzelnen Befehle und Funktionen zu den erstellten Elementen selbst programmiert werden müssen. Ein weiterer Vorteil besteht in der weiten Verbreitung dieser Software, vor allem im naturwissenschaftlichen Bereich. Daher sind zahlreiche vorgefertigte Funktionen und Programmbausteine frei verfügbar, die durch andere Nutzer bereitgestellt werden. So existiert u.a. eine Funktion, die die Darstellung von Kennwerten in einem Netzdiagramm ermöglicht.

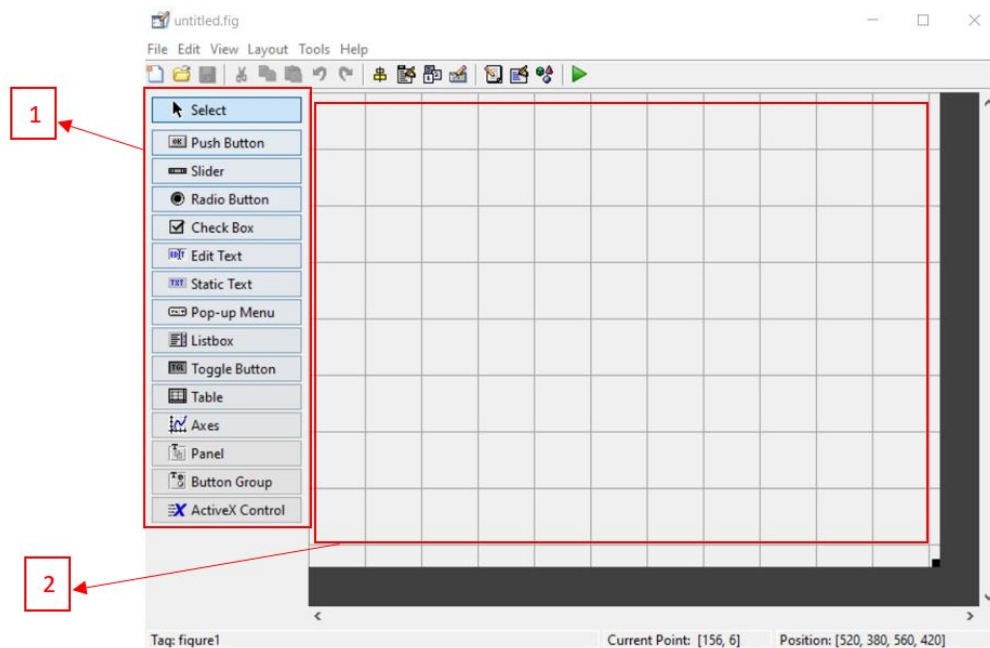


Abbildung 6.1: Toolbox *guide* mit 1) verfügbaren Bausteinen und 2) dem Arbeitsbereich

Aufgrund dieser Vorteile und der allgemein gut überblickbaren Bedienung von *Matlab*, bedingt durch Vorerfahrungen während der ingenieurwissenschaftlichen Ausbildung an der Technischen Universität Dresden, bildet es das ideale Werkzeug zur Umsetzung der Zielstellung.

6.2 GUI mit direkter Erzeugung der Darstellung

6.2.1 Aufbau der Benutzeroberfläche

Als Zwischenschritt der Entwicklung entsteht eine graphische Benutzeroberfläche mit deren Hilfe die charakteristischen Kennwerte direkt über Slider oder Edits eingestellt werden und das daraus resultierende Schaubild angezeigt wird. Folglich wird hier das Modell des Stempelkraftverlaufes nicht berücksichtigt. Die Oberfläche dient so vor allem der Erprobung der Darstellung im Netzdiagramm. Der Aufbau der Oberfläche ist der Abbildung 6.2 zu entnehmen.

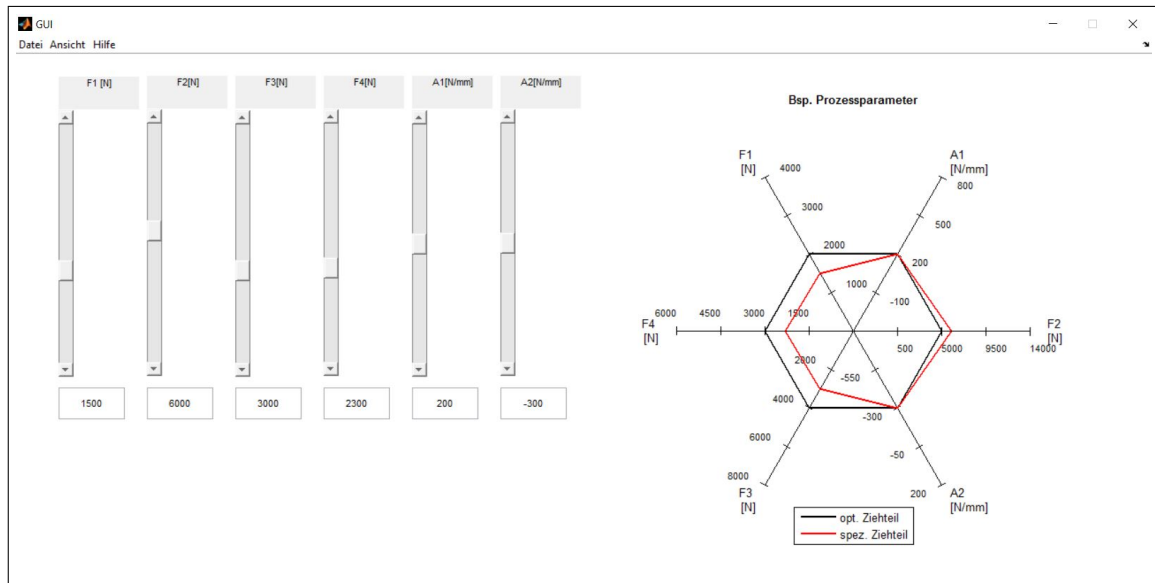


Abbildung 6.2: Fenster der GUI mit direkter Erzeugung der Darstellung

6.2.2 Erklärung der Programmstruktur

Im Allgemeinen erstellt die *Matlab*-interne Toolbox *Guide* zwei Dateien. So wird eine „fig“-Datei angelegt. Diese kann stets wieder mit *Guide* geöffnet werden, um so die einzelnen Dialogbausteine, ihre Eigenschaften und ihre Lage zueinander bearbeiten zu können. Sie speichert also das Layout der GUI ab. Die Programmierung der Funktionen, die bei Betätigung eines Bausteins erfolgen sollen, wird innerhalb der „m“-Datei erzeugt. Diese muss auch aufgerufen werden, wenn die Benutzeroberfläche gestartet werden soll. In diesem Abschnitt wird nun konkret der Aufbau dieser Datei für die vorliegende GUI erläutert.

Matlab legt automatisch nach Erzeugung der GUI in *Guide* Funktionen innerhalb der „m“-Datei an. So finden sich drei verschiedene Funktionen am Programmbeginn (Abbildung 6.4).

```
function varargout = GUI(varargin)

function GUI_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin)

function varargout = GUI_OutputFcn(hObject, eventdata, handles)
```

Abbildung 6.3: zu Beginn von Matlab angelegte Funktionen

Die an erster Stelle stehende Funktion, bezeichnet als die sogenannte Startfunktion, wird nicht weiter bearbeitet. Sie ist die Funktion mit der der Anwender das Fenster

aufruft. Zudem wird in ihr u.a. festgelegt, welche Funktionen der GUI vor dem Start des Fenster, also der eigentlichen Benutzeroberfläche, ausgeführt werden [28].

Die Funktion *OpeningFcn* wird direkt vor dem Fensteraufbau aufgerufen. Hier werden gezielt Änderungen implementiert. Beispielsweise können hier Parameter der Dialogbausteine festgesetzt und bestimmte Startwerte, wie die optimalen Kennwerte des charakteristischen Stempelverlaufes, gesetzt werden. Dazu werden diese Werte in das so bezeichnete *handles* geschrieben und können nach Abspeicherung in jeder anderen Funktion der „m“-Datei aufgerufen und weiterverwendet oder bei Bedarf überschrieben werden.

Die letzte der dargestellten Funktionen dient primär dazu, festzulegen welche Daten zurückgegeben werden sollen [28]. Im konkreten Fall werden hier keine Implementierungen vorgenommen, sodass die Funktion unberührt bleibt.

Im Anschluss finden sich die automatisch erzeugten Funktionen für alle angelegten Dialogbausteine (Abbildung 6.4).

```
edit_F1_Callback(hObject, eventdata, handles)

function edit_F1_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
```

Abbildung 6.4: Bsp. für die *Callback*- und *CreateFcn*-Funktion eines Edits

Die Funktion *CreateFcn* erstellt den jeweiligen Baustein in seiner gewünschten Form. Sie bleibt unverändert, da die Eigenschaften aller Elemente bereits zuvor in *Guide* bestimmt wurden.

Hingegen wird bei den *Callback*-Funktionen eine Vielzahl von Implementierungen durchgeführt. Denn sie wird jeweils aufgerufen, wenn der im Layout erstellte Baustein eine Änderung durch den Nutzer erfährt, z.B. wenn ein Edit ausgefüllt oder ein Slider verschoben wird. Diese Funktionen sind demnach essentiell für die Funktionsweise der GUI.

6.3 GUI mit Erzeugung der Darstellung über das Prozessmodell

6.3.1 Aufbau der Benutzeroberfläche

Nach Umsetzung einer ersten GUI wird darauffolgend die GUI nach den zuvor erarbeiteten Anforderungen (Kapitel 5.4, Seite 39) entwickelt und programmiert. Zunächst wird knapp das mit *Guide* erstellte Layout dieser vorgestellt.

In Abbildung 6.5 ist die Startansicht der GUI dargestellt, die sofort nach dem Fens-teraufbau zu sehen ist. Sie dient gleichzeitig auch der Nutzergruppe „Novize“, aus der Nutzerkontextanalyse, als Standardansicht.

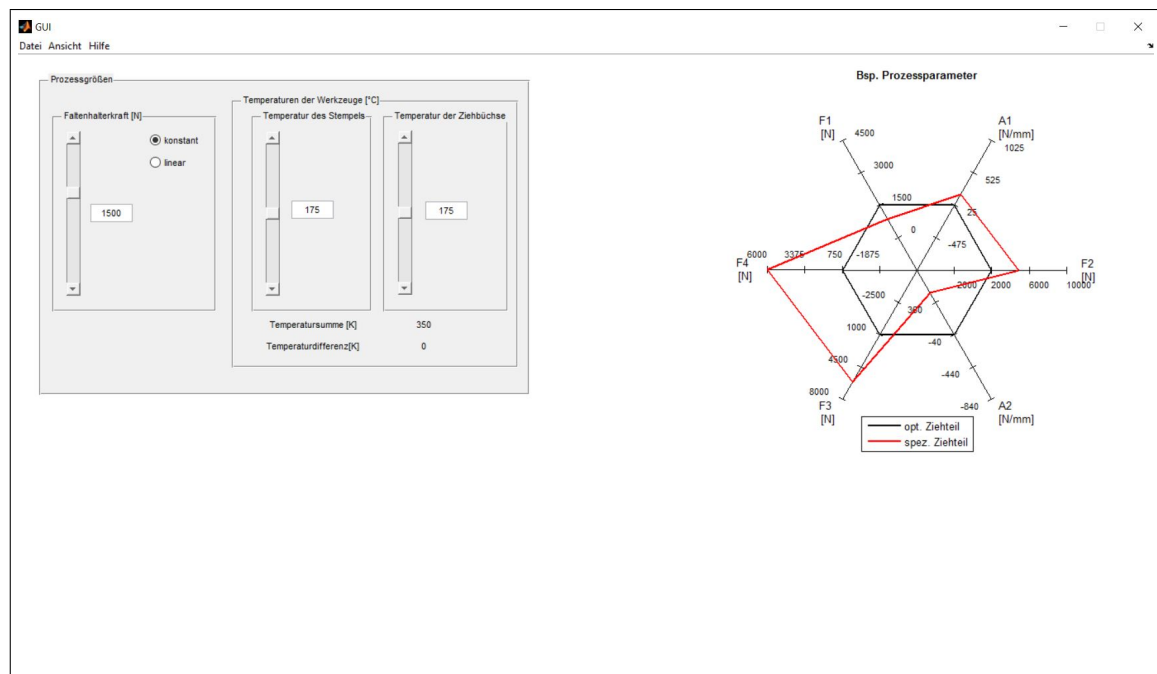


Abbildung 6.5: Startansicht des GUI Fensters (Ansicht für Novize)

Wie auch bei der zuvor vorgestellten Oberfläche in Kapitel 6.2 ab Seite 40 befindet sich hier das Netzdiagramm, zur Darstellung der charakteristischen Kennwerte aus dem Stempelkraftverlauf, auf der rechten Seite. Linkseitig findet sich eine Anordnung von Slidern und Edits zur Variation der Prozessgrößen Faltenhalterkraft sowie Stempel- und Ziehbüchsentemperatur (Abbildung 6.6).

The screenshot shows a software interface for configuring process parameters. The main title is 'Prozessgrößen'. It is divided into three main areas:

- Faltenhalterkraft [N]:** This section has two radio buttons: 'konstant' (which is selected) and 'linear'. Below the radio buttons are two vertical sliders. The top slider has a value of 2000, and the bottom slider has a value of 500.
- Temperaturen der Werkzeuge [°C]:** This section contains two vertical sliders. The left slider is labeled 'Temperatur des Stempels' and has a value of 175. The right slider is labeled 'Temperatur der Ziehbüchse' and also has a value of 175.
- Summary:** Below the temperature sliders, there are two labels: 'Temperatursumme [K]' with a value of 350, and 'Temperaturdifferenz [K]' with a value of 0.

Abbildung 6.6: Einstellung der Prozessgrößen

Mit Hilfe von sog. Radiobuttons kann der Nutzer bestimmen, ob die Faltenhalterkraft konstant ist oder linear verlaufen soll. Für den zweiten Fall erscheinen zwei übereinander angeordnete Slider, jeweils zur Einstellung der oberen bzw. unteren Grenze des Verlaufes. Alternativ kann die Eingabe auch über Eintragen eines Wertes in das zugehörige Edit erfolgen. Ebenso ist dies auch bei der Einstellung der Werkzeugtemperaturen für Stempel und Ziehbüchse möglich. Zusätzlich wird allerdings noch die aus beiden eingestellten Werten berechnete Summe und Differenz für den Nutzer angezeigt. Bei Überschreitung der dafür gültigen Modellgrenzwerte erscheint eine Fehlermeldung und die Slider und Edits werden auf die Ausgangswerte zurückgesetzt.

Im oberen Menübereich kann schnell die Ansicht gewechselt werden (Abbildung 6.7). Es erscheint bei Anwahl das veränderte Layout für die Nutzergruppe der Experten (Abbildung 6.8).



Abbildung 6.7: Einstellung der Ansicht

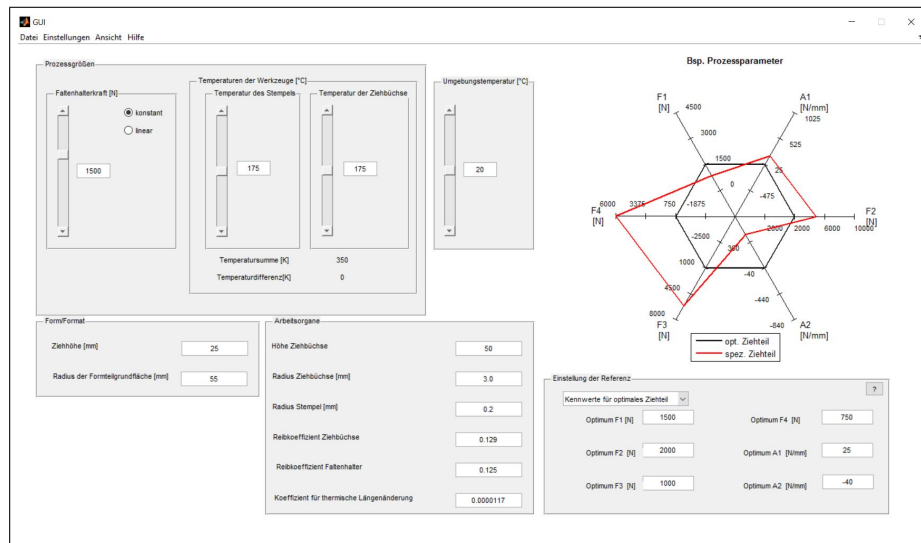


Abbildung 6.8: Ansicht für Experte

Neben den, in der Ansicht für den Novizen, vorhandenen Dialogbausteinen zur Variation der Prozessgrößen, erscheinen nun zusätzlich Edits zur Eingabe von verschiedenen Größen betreffend des Formates bzw. der Form des Ziehformteils und der Eigenschaften der Arbeitsorgane. Zudem ist nun auch ein neuer Einstellungsbereich im Layout sichtbar (Abbildung 6.9).

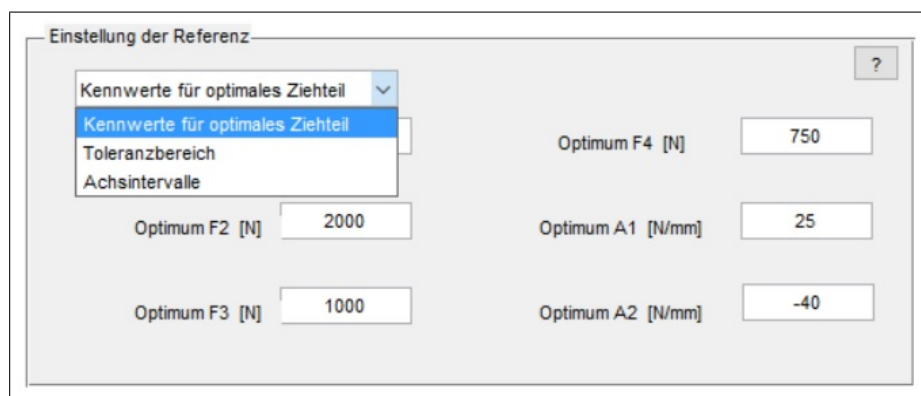


Abbildung 6.9: Ansicht für Experte

Durch Verwendung eines Pop-Up-Menüs kann hierbei zwischen Einstellung der „Kennwerte für ein optimales Ziehteil“, Einstellung des „Toleranzbereiches für ein optimales Ziehteil“ und Einstellungen für die Intervallbreite der Achsen gewählt werden. Spezifisch kann für jede Einstellungsgruppe über den rechten Button (mit Fragezeichen markiert) ein Hilfetext zur Erklärung eingeblendet werden. Die Eingaben selbst können durch Eintragung in Edits vorgenommen werden. Auch das Abspeichern und Aufrufen der gemachten Einstellungen ist, über dafür angeordnete Buttons, vorgesehen.

Neben diesen Einstellungen ist es dem Experten erlaubt, die Ansicht für den Novizen zu bearbeiten, indem er für diesen bestimmte Einstellungsbereiche freigibt oder sperrt (Abbildung 6.10). Ein entsprechender Menüeintrag erscheint dazu am oberen Bildrand des Layouts.

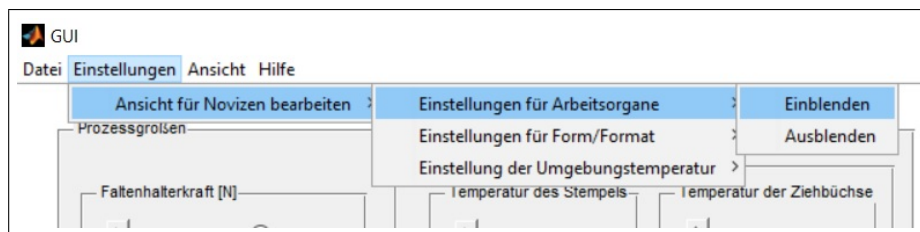


Abbildung 6.10: Ansicht für Novize durch Experte bearbeiten

6.3.2 Erklärung der Programmstruktur

Wie zuvor bei der Erstellung der ersten GUI werden auch bei dieser Weiterentwicklung zu Beginn die drei typischen Funktionen (Abbildung 6.4) von *Matlab* angelegt. Editiert wird dabei allerdings wieder nur die Funktion *OpeningFcn*. Hier wird u.a. implementiert, welche Dialogbausteine zu Beginn sichtbar sind. Darüber hinaus werden für alle vorhandenen Slider und Edits Start-, sowie Minimal- und Maximalwerte festgesetzt, die später jederzeit im Programmcode angepasst werden können. Die Startwerte werden dann auf die jeweiligen Dialogbausteine übertragen. Ein Beispiel hierfür zeigt Abbildung 6.11.

```
temp_ST_opt = 175;      % Startwert/Optimum
temp_ST_min = 100;     % Minimum
temp_ST_max = 250;     % Maximum

% Ablegen im handles
handles.temp_ST_opt = temp_ST_opt;
handles.temp_ST_max = temp_ST_max;
handles.temp_ST_min = temp_ST_min;

% handles abspeichern
guidata(hObject, handles);

% Slider ST
set(handles.slider_temp_ST, 'Min', temp_ST_min);
set(handles.slider_temp_ST, 'Max', temp_ST_max);
set(handles.slider_temp_ST, 'Value', temp_ST_opt);

% Edit ST
set(handles.edit_temp_ST, 'String', num2str(temp_ST_opt));
```

Abbildung 6.11: Implementierung für die Einstellung der Stempeltemp. in der *OpeningFcn*

In dem Beispiel wird zu Beginn neben dem Minimum und Maximum der Stempeltemperatur ein Startwert für diese festgelegt. Anschließend erfolgt das Abspeichern dieser Werte im *handles*, sodass später andere Funktionen in der „.m“-Datei, etwa *Callback*-Funktionen von Dialogbausteinen, darauf Zugriff haben. Folgend wird die Intervallbreite des Sliders definiert, indem die zuvor gesetzten Minimum- und Maximumwerte dem Slider übergeben werden. Auch der Startwert wird auf diese Weise übergeben, sodass die Stelle auf der das Schiebeelement des Sliders nachdem Fensteraufbau zuerst steht, festgelegt ist. Abschließend wird der entsprechende Wert auch dem Edit übergeben, sodass dieser dort nach dem Start der GUI ebenso angezeigt werden kann. Analog wird diese Prozedur für die anderen Dialogbausteine umgesetzt.

In der Funktion *OpeningFcn* wird zudem eine Anfangsdarstellung im Netzdiagramm erzeugt. Die zu Beginn gesetzten Werte für die Optima der Kennwerte, die zugehörigen Toleranzbereiche, sowie die Achsintervalle können dazu bei Bedarf im Programmcode verändert werden. Sie haben Einfluss auf die erzeugte Anfangsdarstellung im Netzdiagramm. Später können sie auch über das Layout durch Bearbeitung der Werte in den zugehörigen Edits überschrieben werden.

Nach der Funktion *OpeningFcn* finden sich wieder die *Callback*- und *CreateFcn*-Funktionen aller Dialogbausteine. Auf die spezifische Implementierung soll an dieser Stelle nur knapp, mit Hilfe eines allgemeinen Beispiels zum grundsätzlichen Ablauf des Programms nach Variation eines Parameters, eingegangen werden.

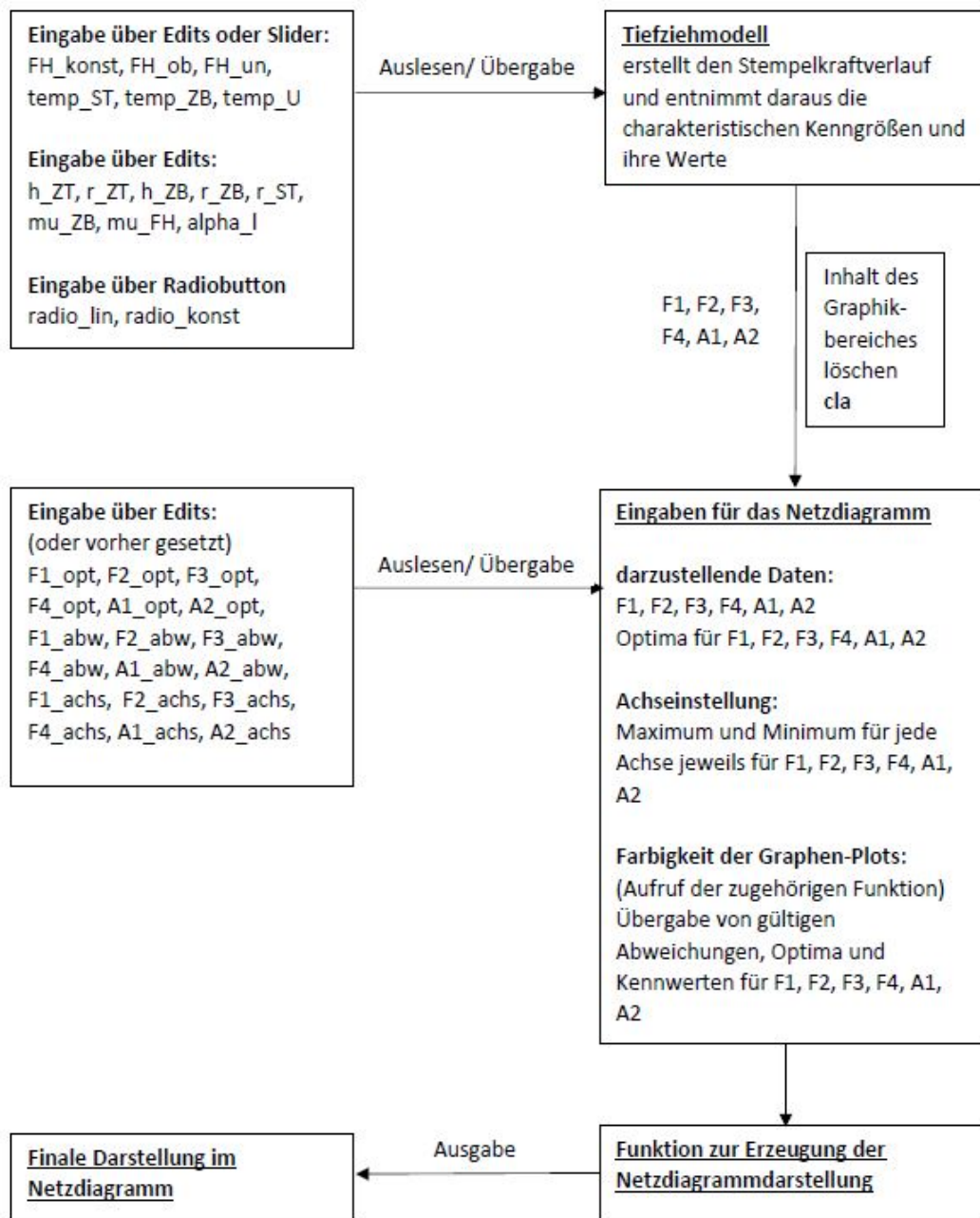


Abbildung 6.12: Grundlegender Ablauf des Programms

Bei Manipulation eines Prozessparameters werden alle Edits und Slider des Layouts ausgelesen und die Werte programmintern abgelegt. Anschließend werden diese dem Modell, welches den Stempelkraftverlauf erzeugt und daraus die charakteristischen Kennwerte definiert, übergeben. Die final ausgegebenen Kennwerte werden abgespeichert und zusammen mit den eingestellten Optima, Minima und Maxima sowie Achsfaktoren für die Berechnung der Achsintervalle für die einzelnen Kennwerte, der Funktion zur Erzeugung der Netzdiagrammdarstellung übergeben. Zuvor läuft jedoch noch eine Funktion ab, die in Abhängigkeit der Lage der Kennwerte im Toleranzbereich des

Optimums, über die Farbigkeit des Graphen im Diagramm entscheidet. Schlussendlich wird das Diagramm im Layout der GUI für den Nutzer präsentiert.

Es folgen abschließend in der „.m“-Datei Funktionen, die für die Umsetzung des Menüs am oberen Fensterrand verantwortlich sind. In diesem sind wiederum u.a. Funktionen zum Abspeichern und Laden aller gemachten Eingaben enthalten.

6.3.3 Umsetzung des Prozessmodells

Die vorgestellten Annahmen (2.2, Seite 11) zur Modellierung des charakteristischen Stempelkraftverlaufes nach HAUPTMANN werden identisch im Prozessmodell der GUI umgesetzt. Dazu wird eine separate Funktion angelegt, sodass ein nachträgliches Bearbeiten leicht ermöglicht wird. Innerhalb des Modells werden Messwerte, zuvor aufgenommen von HAUPTMANN, aus Versuchen zur Komprimierung, Biegung und Stauchung des Ziehkartons *ZKH 510* eingespielt. Nachträglich können andere Messdaten eingefügt werden. Ein beigefügtes *Matlab*-Skript hilft dabei, die Umwandlung von Messwerten, die in einer Excel-Tabelle gespeichert sind, zu realisieren. Ein simpleres Einlesen von Messdaten ist in zukünftigen Weiterentwicklungen vorzusehen. Jedoch sollte davor zunächst die Genauigkeit des eigentlichen Modells erhöht werden, denn die eingebundenen empirischen Einflussfaktoren beruhen nur auf unbegründet angenommenen Schätzwerten. Eine hinreichende Quantifizierung der Faktoren ist keiner Dokumentation von HAUPTMANN zu entnehmen. Dadurch ist es auch bisher nicht sinnvoll möglich, Prozessdaten aus dem Tiefzieh-Versuchsstand einzupflegen.

Dem, mit dem Modell erzeugten, Stempelkraftverlauf werden anschließend die charakteristischen Kennwerte für die jeweiligen Kenngrößen $F1$, $F2$, $F3$, $F4$, $A1$ und $A2$ entnommen. Sie werden schlussendlich von der Funktion ausgegeben und im weiteren Verlauf innerhalb des Programmcodes der GUI genutzt.

Allgemein ist das Modell auf seine Genauigkeit zu hinterfragen. Vor allem die für den Experten zugänglichen Einstellungen sollten vorsichtig behandelt und deren Auswirkungen auf die Darstellung stets auf Plausibilität geprüft werden.

7 Schlussbemerkung

Die umgesetzte GUI stellt die erste interaktive Bedienoberfläche, zur Erprobung des Einflusses verschiedener Prozess- und Einflussparameter auf die Ziehteilqualität für den Tiefzieh-Versuchsstand der TU Dresden, bereit.

Aufgrund der Beschränktheit des enthaltenen Modells für das Tiefziehen sind jedoch nur erste Tendenzen für den Nutzer ableitbar. Ziel weiterer Arbeiten dieser Thematik könnte die Überarbeitung des im Hintergrund ablaufenden Modells sein. Enthaltene empirische Einflussfaktoren, die durch HAUPTMANN aufgestellt wurden, müssten hinsichtlich ihrer angenommenen Werte hinterfragt werden. Vor allem da es wegen fehlender Dokumentation nicht möglich war, an die durch HAUPTMANN ursprünglich getroffenen Annahmen zu gelangen, ergibt sich hier ein großes Potential zur Verbesserung der Modellgenauigkeit.

Auch die Kommunikation der GUI mit der Steuerung des Tiefzieh-Versuchsstandes der TU-Dresden und der damit einhergehende Austausch von Prozessdaten, können Bestandteil einer folgenden Zielstellung, nachdem die Modellgenauigkeit erhöht wurde, sein.

Allgemeinhin ist es empfehlenswert das Modell stets an den aktuellen Stand der Wissenschaft anzupassen und zu erweitern. Potentiale dafür hat WALLMEIER in seinen Arbeiten, u.a. in [9], aufgezeigt. Sinnvoll wäre es dahingehend auch die Simulation weiterer Materialien innerhalb des Modelles zu ermöglichen, sodass der Nutzer über das Layout sein zu verwendendes Material für das Ziehformteil auswählen kann. Die Weiterentwicklung des Einspiels von Messdaten aus Tiefziehversuchen ist eine dafür notwendige Maßnahme.

Optimierungsbedarf besteht auch in der Annahme der optimalen Kennwerte des Stempelkraftverlaufes für das ideale qualitätsgerechte Ziehteil und die damit verbundene Erstellung der Referenz im Netzdiagramm. Denkbar wäre hier eine Anfertigung von Referenzprofilen, je nach Anforderungen des Nutzers an das Ziehteil. Nach Auswahl eines solchen Profils würde sich die Darstellung der Referenz im Netzdiagramm automatisch anpassen. Auch die jeweils zugehörigen Toleranzbereiche der Optima, die bisher nur unbegründet angenommen wurden, könnten hinsichtlich ihrer jeweiligen Ausprägung näher untersucht werden.

Darüber hinaus ist es vorstellbar alternative Darstellungsarten innerhalb des Layouts der GUI zu realisieren. Der Nutzer könnte so, je nach Bedarf, zwischen verschiedenen Arten der Darstellung der charakteristischen Kennwerte des Stempelkraftverlaufes wechseln.

Von besonderer Wichtigkeit ist kurzfristig die Durchführung einer umfassenden Validierung und Verifizierung hinsichtlich der Benutzbarkeit der Oberfläche.

8 Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit hatte die Entwicklung und Umsetzung einer GUI, zur Erprobung von Wechselwirkungen zwischen verschiedenen Prozessparametern beim Tiefziehen von faserbasierten Materialien, wie Papier und Karton, zum Ziel.

Nach einer Recherche zum Prozess des Tiefziehen und seiner Modellierung folgte das Erarbeiten von Grundsätzen bei der Erstellung und Gestaltung von grafischen Benutzerschnittstellen. Insbesondere stand dabei die Art der Eingabe von numerischen Parametern und die Visualisierung von Informationen im Vordergrund.

Mit den gewonnen Erkenntnissen wurden Analysen, hinsichtlich der Nutzergruppen und ein- und auszugebender Parameter durchgeführt. Mit deren Ergebnissen, sowie den eingangs in der Aufgabenstellung festgelegten Wünschen, wurden Anforderungen, die an die spezifische GUI gestellt werden können, zusammengetragen.

Zur konkreten Umsetzung der Anforderungen wurde mit der Software Matlab und dem darin integrierten Assistenten *Guide*, zur Erstellung von graphischen Benutzerschnittstellen, das Fensterlayout der Oberfläche erstellt. Anschließend wurden weitere Funktionen und das Tiefziehmodell in den Programmcode implementiert.

Das Ergebnis ist die erste Umsetzung einer GUI für den Tiefzieh-Versuchsstand an der TU Dresden. Sie offenbart daher zahlreiche Potentiale zur Weiterentwicklung und stetigen Anpassung.

Dresden, 01.05.2017

Ort, Datum

Verfasser

Literatur

- [1] Majschak, J.-P., Schult, A. und Beck, E.: „Steigerung der Effizienz von Verarbeitungs- und Verpackungsanlagen durch Wirkungsgradanalysen“. In: *Pharma + Food* 18 (2015), S. 66–68.
- [2] Oehm, L.: „Kooperative Störungsdiagnose durch Bediener und Assistenzsystem für Verarbeitungsanlagen“. In: Zweite transdisziplinäre Konferenz zum Thema „Technische Unterstützungssysteme, die die Menschen wirklich wollen“. Dresden.
- [3] Goldhahn, H.: „Aufbau eines Systems verarbeitungstechnischer Grundlagen“. Diss. Dresden: Technische Universität Dresden, 1969.
- [4] Bleisch, G., Majschak, J.-P. und Langowski, H.-C.: *Lexikon Verpackungstechnik*. 2. Heidelberg: Hüthig, 2014. ISBN: 978-3-95468-034-4.
- [5] Hauptmann, M.: „Die gezielte Prozessführung und Möglichkeiten zur Prozessüberwachung beim mehrdimensionalen Umformen von Karton durch Ziehen“. Diss. Dresden: Technische Universität Dresden, 2010.
- [6] Scherer, K.: „Untersuchungen über die Ziehfähigkeit und den Ziehvorgang von Pappe“. Diss. Dresden: Technische Hochschule Dresden, 1932.
- [7] Heinz, O.: *Ungenügende Ziehqualität und ihre Ursachen*. Buchbinderei und Papierverarbeitung 6. 1966.
- [8] Oehm, L.: „Untersuchung des Einlaufverhaltens beim Tiefziehen von Papier und Karton“. Diss. Dresden: Technische Universität Dresden, 2010.
- [9] Wallmeier, M.: „Vergleich von Strategien zur Simulation der Kompression in Blattebene bei der 3D Umformung von Karton“. Diss. Dresden: Technische Universität Dresden, 2012.
- [10] Wallmeier, M.: „Explicit FEM analysis of the deep drawing of paperboard“. In: *Mechanics of Materials* 89 (2015), S. 202–215.
- [11] Johannsen, G.: *Mensch-Maschine-Systeme*. Berlin, Heidelberg: Springer, 1993. ISBN: 978-3-540-56152-1.
- [12] Butz, A. und Krüger, A.: *Mensch-Maschine-Interaktion*. München: De Gruyter Oldenbourg, 2014. ISBN: 978-3-486-71967-3.

- [13] *VDI/VDE 3850: Gebrauchstaugliche Gestaltung von Benutzungsschnittstellen für technische Anlagen.* 2000.
- [14] *VDI/VDE 3699, Blatt 2: Prozessführung mit Bildschirmen - Grundlagen.* 2014.
- [15] Preim, B. und Dachzelt, R.: *Interaktive Systeme: Grundlagen, Graphical User Interfaces, Informationsvisualisierung.* 2. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer, 2010. ISBN: 978-3-642-05402-0.
- [16] Balzert, H.: *Software-Ergonomie.* 1983. ISBN: 978-3-519-02433-0.
- [17] Schmidt, D.: „Darstellungsmöglichkeiten von Prozessdaten zum Vergleich von Fehlerfällen beim Umformen von Karton“. Diplomarbeit. Dresden: Technische Universität Dresden, 2017.
- [18] Upton, C. und Doherty, G.: „Extending Ecological Interface Design principles: A manufacturing case study“. In: *International Journal of Human-Computer Studies* 66.4 (2008), S. 271–286.
- [19] *DIN EN ISO 9241-210: Ergonomie der Mensch-System-Interaktion – Teil 210: Prozess zur Gestaltung gebrauchstauglicher interaktiver Systeme.* 2011.
- [20] *DIN EN ISO 9241-110: Ergonomie der Mensch-System-Interaktion – Teil 110: Grundsätze der Dialoggestaltung.* 2008.
- [21] *DIN EN ISO 9241-143: Ergonomie der Mensch-System-Interaktion – Teil 143: Formulardialoge.* 2012.
- [22] Zeidler, A. und Zellner, R.: *Software-Ergonomie : Techniken der Dialoggestaltung.* 2. verb. Aufl. München, Wien: Oldenbourg, 1994. ISBN: 978-3-486-22720-8.
- [23] *DIN EN ISO 9241-161: Ergonomie der Mensch-System-Interaktion – Teil 161: Leitfaden zu visuellen User-Interface-Elementen.* 2016.
- [24] *DIN EN ISO 9241-15: Ergonomische Anforderungen für Bürotätigkeiten mit Bildschirmgeräten – Teil 15: Dialogführung mittels Kommandosprache.* 2000.
- [25] Bertin, J.: *Graphische Darstellungen und die graphische Weiterverarbeitung der Information.* Berlin, Boston: De Gruyter, 1982. ISBN: 978-3-11-006900-6.
- [26] Hollifield, B. und Perez, H.: *Maximize Operator Effectiveness: High Performance HMI Principles and Best Practices, Part 1 of 2.* 2015.

- [27] Bennet, K., Toms, M. und Woods, D.: „Emergent Features and Graphical Elements: Designing More Effective Configural Displays“. In: *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society* 35.1 (1993), S. 71–97.
- [28] Stein, U.: *Programmieren mit MATLAB : Programmiersprache, grafische Benutzeroberflächen, Anwendungen*. 5. Auflage. München : Fachbuchverl. Leipzig im Carl Hanser Verl., 2015. ISBN: 978-3-446-44391-4.

Abbildungsverzeichnis

2.1	Charakteristisches Formteil als Ergebnis des Ziehprozesses aus [5] . . .	2
2.2	Schematischer Prozessablauf beim Ziehen von Papier und Karton aus [5]	3
2.3	Schematische Darstellung der Messgrößen Rückstellwinkel φ und Durchbiegung a der Zarge am Formteil aus [5]	4
2.4	lokale Schwärzungen an der Zarge eines Formteils aus [5]	5
2.5	Zipfelbildung an der Zarge eines Formteils aus [5]	5
2.6	Kenngrößen des Kraftverlaufes am Beispiel der Variation der Temperatursumme aus [5]	8
2.7	Schematische Darstellung der Verhältnisse in der Ziehbüchse aus [5] . .	13
2.8	Schematische Darstellung der Verhältnisse im Flanschbereich aus [5] . .	13
2.9	Biegestellen beim Ziehprozess von Karton aus [5]	14
2.10	Reibkräfte innerhalb des Ziehprozesses von Karton	15
2.11	Kennzeichnung des Fachgebietes der Mensch-Maschine-Systeme durch die Überschneidung von drei Methodenbereichen - bezogen auf Mensch, System und Software aus [11]	17
2.12	Aktivitäten zur benutzungsgerechten Gestaltung aus [13]	19
2.13	Basiselemente: Label, Textfeld, Pushbuttons, Checkboxes, Radiobuttons, analoge Anzeiger (Scales) und Listboxen [22]	21
2.14	Beispiel für ein analoges Formularelement (Schieberegler), bei dem ein Ziehpunkt entlang einer als Balken dargestellten horizontalen Achse bewegt wird, um einen in Prozent dargestellten Wert zu erhöhen oder zu verringern aus [23]	23
2.15	Beispiel für die Kombination verschiedener Varianten der Eingabe numerischer Werte aus [15]	23
2.16	beispielhafte Darstellung eines Dial-Widgets aus [15]	24
2.17	beispielhafte Darstellung eines Double Slider-Widgets [15]	24
2.18	Beispiel einer Balkendarstellung mit Grenzbereich und Sollwersteller aus [14]	25
2.19	Zuordnung der visuellen Variablen zu den verschiedenen Wahrnehmungsarten [25]	26
2.20	analoge Darstellung der Prozessdaten eines Kraftwerkes in einem Configural Display aus [26]	27
2.21	Darstellung mittels Netzdiagramm mit Toleranzbereich (grau), Sollwert (schwarz) und konkretem Fall (rot) aus [17]	29
2.22	Darstellung mittels Liste mit dem Vergleich zweier Fälle aus [17]	29

2.23	Darstellung mittels Zeiger mit Soll-Wert und konkretem Fall (grün) aus [17]	29
2.24	Darstellung mittels zweiachsigem Diagramm mit Toleranzbereich (grau) und konkretem Fall (grün) aus [17]	29
5.1	Gegenüberstellung des Referenzziehteils mit dem konkret eingestellten Ziehteil mit Rotfärbung	38
5.2	Gegenüberstellung des Referenzziehteils mit dem konkret eingestellten Ziehteil mit Grünfärbung	38
6.1	Toolbox <i>guide</i> mit 1) verfügbaren Bausteinen und 2) dem Arbeitsbereich	40
6.2	Fenster der GUI mit direkter Erzeugung der Darstellung	41
6.3	zu Beginn von Matlab angelegte Funktionen	41
6.4	Bsp. für die <i>Callback</i> - und <i>CreateFcn</i> -Funktion eines Edits	42
6.5	Startansicht des GUI Fensters (Ansicht für Novize)	43
6.6	Einstellung der Prozessgrößen	44
6.7	Einstellung der Ansicht	45
6.8	Ansicht für Experte	45
6.9	Ansicht für Experte	45
6.10	Ansicht für Novize durch Experte bearbeiten	46
6.11	Implementierung für die Einstellung der Stempeltemp. in der <i>OpeningFcn</i>	47
6.12	Grundlegender Ablauf des Programms	48
D.1	Positionen des Stempelweges [5]	XVII
D.2	Abstandsfunktion am Einlauf des Materials in den Ziehspalt aus [5] . .	XIX
D.3	Ziehspalt als Funktion des Stempelweges aus [5]	XX

Tabellenverzeichnis

2.1	Systematik der Einflussgrößen auf den Ziehprozess von Karton	7
2.2	Gültigkeitsgrenzen für die Modellierung	12
2.3	Übersicht von Dialogbausteinen für die numerische Eingabe von Werten	22
5.1	Nutzerkontextbeschreibung	33
5.2	Aufstellung aller notwendigen Eingabeparameter für die GUI	35

Anhangsverzeichnis

A Prinzipien der Dialoggestaltung	XV
B Prinzipien der Informationsgestaltung	XV
C Hinweise für die Gestaltung von benutzerfreundlichen Mensch-Maschine-Systemen	XVI
D Modellierung des Stempelkraftverlaufes nach Hauptmann	XVII
D.1 Modellierung geometrischer Verhältnisse	XVII
D.2 Modellierung der Formänderungskräfte	XX
D.3 Modellierung der Reibkräfte	XXIV
E Anforderungsliste für die GUI	XXV

A Prinzipien der Dialoggestaltung

- **Aufgabenangemessenheit:** Wird der Nutzer darin unterstützt seine Arbeitsaufgabe zu erledigen, spricht man von einer aufgabenangemessenen Interaktion.
- **Selbstbeschreibungsfähigkeit:** Ist dem Nutzer zu jedem Zeitpunkt beim Umgang mit dem interaktiven System ersichtlich an welcher Stelle er sich im Dialog befindet, so ist der Dialog selbstbeschreibungsfähig.
- **Erwartungskonformität:** Die entsprechend gestaltete erwartungskonforme Schnittstelle entspricht den Anforderungen des Nutzers aus dem Nutzungskontext und allgemeinen Konventionen.
- **Lernförderlichkeit:** Durch einen lernförderlichen Dialog wird der Nutzer beim Erlernen der Nutzung des interaktiven Systems unterstützt und angeleitet.
- **Steuerbarkeit:** Der Nutzer kann den Dialogablauf starten und beeinflussen bis das definierte Arbeitsziel erreicht ist.
- **Fehlertoleranz:** Trotz fehlerhafter Eingaben während des Dialogs, wird das beabsichtigte Arbeitsergebnis mit keinem oder geringen Korrekturaufwand erreicht.
- **Individualisierbarkeit:** Die Interaktion kann als individualisierbar bezeichnet werden, wenn der Nutzer die Darstellung von Informationen zur Anpassung an individuelle Fähigkeiten und Bedürfnisse ändern kann.

B Prinzipien der Informationsgestaltung

- **Entdeckbarkeit (Erkennbarkeit, Auffälligkeit):** Die Information sollte leicht auffindbar sein bzw. sollte die Aufmerksamkeit des Nutzer schnell zur benötigten Information gelenkt werden.
- **Lesbarkeit:** Die Information sollte leicht gelesen werden können.
- **Unterscheidbarkeit:** Die angezeigte Information sollte sich möglichst genau von anderen Daten abgrenzen lassen.
- **Eindeutigkeit (Klarheit):** Der Informationsgehalt sollte schnell und genau vermittelt werden.
- **Kompaktheit (Prägnanz):** Es sollten nur die Information dargestellt werden, die für Erledigen der Aufgabe benötigt wird.
- **Konsistenz:** Gleiche Information sollten stets auf gleiche Art und Weise dargestellt werden.

- Zusammengehörigkeit: Zusammengehörige Informationen sollte man so gestalten, dass sie als Gruppe wahrnehmbar sind.
- Kontinuität: Information sollten stets so platziert werden, dass der Nutzer sein Blickfeld fortsetzen kann und ohne Unterbrechung zur nächsten benötigten Information gelangt.

C Hinweise für die Gestaltung von benutzerfreundlichen Mensch-Maschine-Systemen

- Allgemein sind nicht schematische Darstellungen zu bevorzugen.
- Der Farbeinsatz sollte sparsam, spezifiziert und konsistent erfolgen.
- Die Benutzerschnittstelle wird mit einem grauen Hintergrund gestaltet, um Blendungen und Reflexionen, die ein Betrachten und Ablesen behindern können, zu vermeiden.
- Animationen sind nur für spezifiziertes Alarmverhalten zu verwenden.
- Messdaten und ihre Werte bei normalen und abnormalen Situationen, wie Störung und Alarm, sollen analog repräsentiert werden.
- Es sind einfache 2D-Darstellungen gegenüber 3D-Darstellungen zu bevorzugen.
- Prozessdaten sollten im Informationskontext angezeigt werden.

D Modellierung des Stempelkraftverlaufes nach HAUPTMANN

D.1 Modellierung geometrischer Verhältnisse

Die Nullposition des Stempelwegs s_{ST} wird so beim Aufsetzen des Stempels auf den Karton definiert. Beim Einfahren des Stempels bis zu $s_{ST.min}$ (Abbildung D.1) tritt die maximale Komprimierung bei Erreichen des minimalen Ziehspaltes auf. Diese Position berechnet sich zu

$$s_{ST.min} = d_{Mat} + r_{ST} + r_{ZB} \quad (D.1)$$

Hierbei ist d_{Mat} die Dicke des Kartonzuschnittes, r_{ST} der Radius der Verrundung der Stempelstirnseite und r_{ZB} der Radius der Verrundung am oberen Bereich der Ziehbüchse.

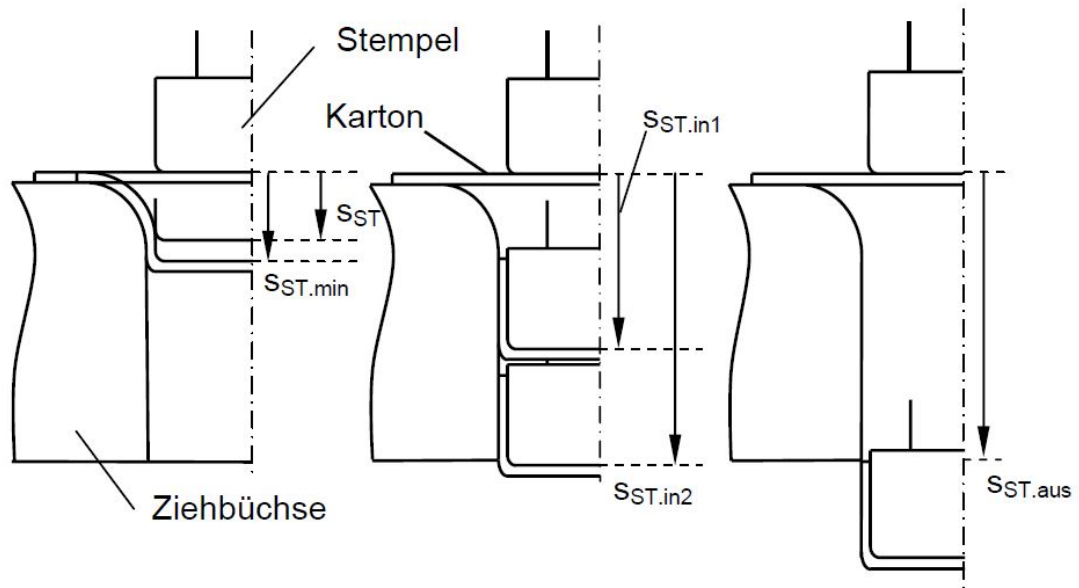


Abbildung D.1: Positionen des Stempelweges [5]

Anschließend wird das Material vollständig bei

$$s_{ST.in1} = s_{ST.min} + h_{ZT} - r_{ST} \quad (D.2)$$

mit h_{ZT} der Höhe des Ziehteils, vollständig in die Ziehbüchse eingezogen (Abbildung D.1). Unter Vernachlässigung der Längsdehnung der Zarge ist Mantelfläche nun über

der gesamten Ziehhöhe h_{ZT} in der Ziehbüchse unter Komprimierung. Der Zagenrand steht dabei bei Position $s_{ST.min}$. Die Ziehbüchse weist stets eine größere Höhe h_{ZB} auf als das Ziehteil.

Im weiteren Verlauf wird das Material unter Komprimierung durch die Ziehbüchse gezogen und erreicht dabei die Stempelposition von der an Material die Ziehbüchse verlässt bei:

$$s_{ST.in2} = s_{ST.min} + h_{ZB} \quad (D.3)$$

Die Position bei der das Material die Ziehbüchse vollständig verlassen hat und die Stempelpkraft annähernd zu Null wird, berechnet sich zu

$$s_{ST.aus} = s_{ST.min} + h_{ZB} + h_{ZT} - r_{ST} \quad (D.4)$$

Die Komprimierung ist durch die Entwicklung des Abstandes zwischen Stempel und Ziehbüchse gekennzeichnet. HAUPTMANN definiert diesen Abstand als zusammengesetzte Funktion $a(s_{ST})$ in Abhängigkeit des Stempelweges (Abbildung D.2). Der erste Teil beschreibt den Einlauf des Materials bis zum Erreichen des minimalen Ziehspaltes a_{min} und berechnet sich zu

$$a_1(s_{ST}) = \sqrt{(r_{ZB} + a_{min} + r_{ST})^2 + (s_{ST.min} - s_{ST})^2} - r_{ZB} - r_{ST} \quad (D.5)$$

Der zweite Teil wird mit

$$a_2(s_{ST}) = \frac{D_{ZB} - D_{ST}(s_{ST})}{2} + \Delta l_a \quad (D.6)$$

ermittelt. D_{ZB} beschreibt den konstanten Durchmesser der Ziehbüchse. Im Gegensatz dazu variiert der Durchmesser des Stempels $D_{ST}(s_{ST})$ in Abhängigkeit vom Stempelweg. Mit der Gleichung

$$D_{ST}(s_{ST}) = D_{ST.u} - 2l_{Ko}(s_{ST}) \quad (D.7)$$

kann er ermittelt werden. $D_{ST.u}$ beschreibt hier den unteren Durchmesser des Stempels, der nach

$$D_{ST.u} = D_{ZB} - 2a_{min} \quad (D.8)$$

mit $a_{min} = d_{mat}$ berechnet werden kann. $l_{Ko}(s_{ST})$ definiert die Verringerung des Stem-

peldurchmessers zwischen $s_{ST.min}$ und $s_{ST.in1}$ mit

$$l_{Ko}(s_{ST}) = \sqrt{(s_{Ko}(s_{ST})/\cos(\alpha))^2 - s_{Ko}(s_{ST})^2} \quad (D.9)$$

s_{Ko} ist eine eingeführte Hilfsvariable, die aus der Differenz zwischen Stempelweg und der Position maximaler Komprimierung nach

$$s_{Ko}(s_{ST}) = s_{ST} - s_{ST.min} \quad (D.10)$$

ermittelt werden kann. Der notwendige Winkel α wird mit dem unteren und oberen Stempeldurchmesser $D_{ST.u}$ berechnet zu

$$\tan(\alpha) = \frac{D_{ST.u} - D_{ST.o}}{2h_{ZT}} \quad (D.11)$$

wobei $D_{ST.o}$ mit

$$D_{ST.o} = \sqrt{D_{ZB}^2 - 4(D_{ZB} + 2h_{ZT}) * a_{min}} \quad (D.12)$$

ableitbar ist. Zur vollständigen Berechnung des zweiten Teils der Abstandsfunktion muss nun noch ergänzend die thermische Längenänderung nach

$$\Delta l_a = \frac{\alpha_l}{2} * (D_{ZB} * (T_{ZB} - T_U) - D_{ST}(s_{ST}) * (T_{ST} - T_U)) \quad (D.13)$$

mit α_l als Koeffizienten für die thermische Längenänderung sowie T_U der Umgebungstemperatur, T_{ZB} der Ziehbüchsentemperatur und T_{ST} der Stempeltemperatur, ermittelt werden.

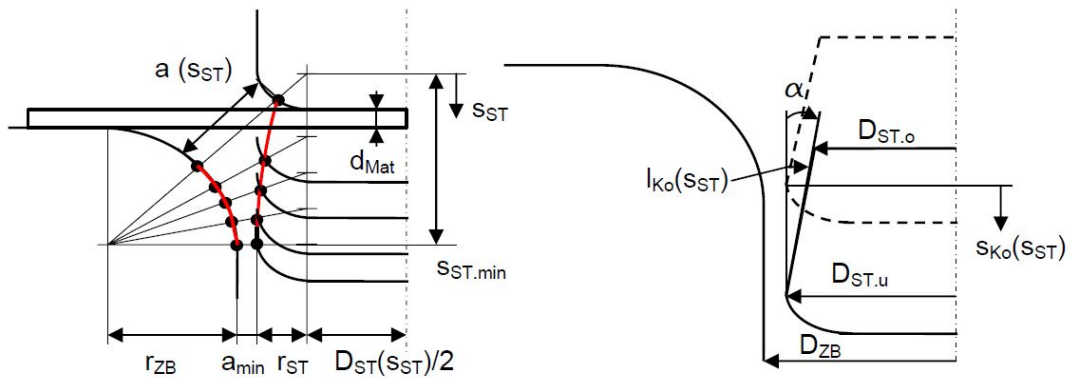


Abbildung D.2: Abstandsfunktion am Einlauf des Materials in den Ziehspalt aus [5]

Nach Zusammensetzung beider Teile der Funktion ergibt sich nun somit der beispielhafte nachstehende Verlauf für den Abstand des Ziehspaltes $a(s_{ST})$ (Abbildung D.3).

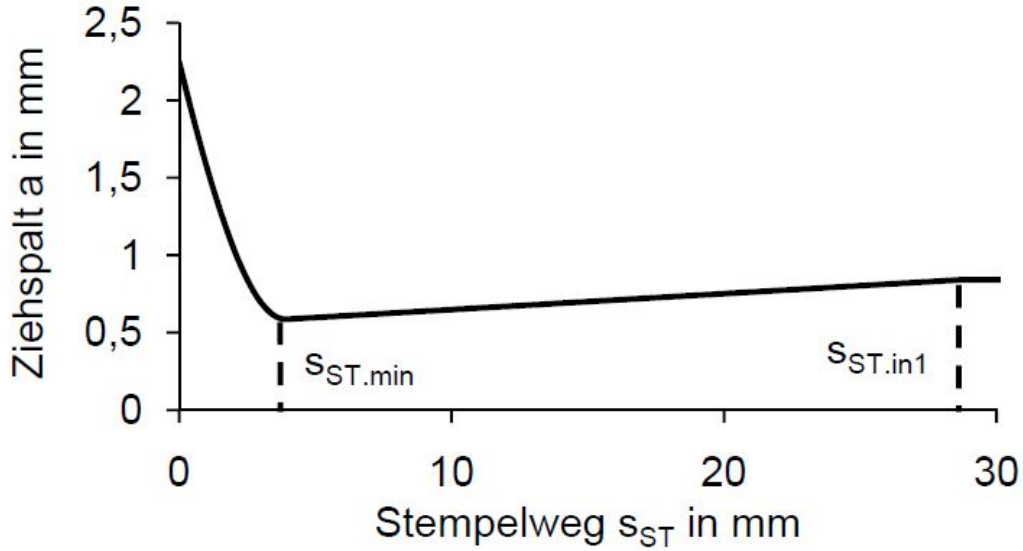


Abbildung D.3: Ziehspalt als Funktion des Stempelweges aus [5]

D.2 Modellierung der Formänderungskräfte

Die grundlegende Presskraft im Prozess $F_{Ko}(s_{ST})$ kann mit Hilfe der wirkenden Fläche für die Komprimierung $A_{Ko}(s_{ST})$ (Gleichung D.16) und dem Pressdruck im Prozess $p_{Ko}(s_{ST})$ (Gleichung D.15) zu

$$F_{Ko}(s_{ST}) = p_{Ko}(s_{ST}) * A_{Ko}(s_{ST}) \quad (D.14)$$

ermittelt werden. Für $A_{Ko}(s_{ST})$ und $p_{Ko}(s_{ST})$ gilt entsprechend

$$p_{Ko}(s_{ST}) = \frac{F_{int}(\kappa_{Fa}(s_{ST}))}{A_{Pr}} \quad (D.15)$$

und

$$A_{Ko}(s_{ST}) = D_{ZB} * \pi * s_{Ko}(s_{ST}) \quad (D.16)$$

Für den Pressdruck bezogen auf die Probenfläche A_{Pr} wird also neben der Probenfläche A_{Pr} ein aus Versuchen gewonnener interpolierter Kraftverlauf in Abhängigkeit der Komprimierung benötigt. Die von der Stempelposition abhängige Komprimierung

$\kappa_{Fa}(s_{ST})$ kann mit der Materialdicke in Abhängigkeit vom Stempelweg $d_{Fa}(s_{ST})$ sowie der bereits ermittelten zusammengesetzten Ziehspaltfunktion $a(s_{ST})$ nach Gleichung D.17 ermittelt werden.

$$\kappa_{Fa}(s_{ST}) = \frac{d_{Fa}(s_{ST}) - a(s_{ST})}{d_{Fa}(s_{ST})} \quad (D.17)$$

Die Materialdicke ist während des Prozesses nicht konstant. Ihr Zuwachs zwischen den Stempelpositionen $s_{ST.min}$ und $s_{ST.in1}$ kann mit der Dickenfunktion

$$d_{Fa}(s_{ST}) = d_{Mat} + \Delta d_{Mat}(s_{ST}) \quad (D.18)$$

dargestellt werden. So wird zur Ausgangsmaterialdicke d_{Mat} der Summand $\Delta d_{Mat}(s_{ST})$ hinzu addiert. Dieser beschreibt den Dickenzuwachs und ist insbesondere von der Faltenhalterkraft F_{FH} abhängig, sodass zur Berechnung ein weiterer Faktor zur Berücksichtigung des Einflusses der Faltenhalterkraft K_{FH} (Gleichung D.19) eingeführt wird.

$$K_{FH} = K_{FH.min} + (K_{FH.max} - K_{FH.min}) * \left(1 - \frac{F_{FH} - F_{FH.min}}{F_{FH.max} - F_{FH.min}}\right)^2 \quad (D.19)$$

$F_{FH.min}$ und $F_{FH.max}$ bezeichnen die Extrema der Faltenhalterkraft. Mit diesem Faktor kann anschließend der Dickenzuwachs mit

$$\Delta d_{Mat}(s_{ST}) = K_{FH} * \frac{d_{Mat}}{2} * \frac{s_{ST} - s_{ST.min}}{s_{ST.in1} - s_{ST.min}} \quad (D.20)$$

berechnet werden. Die nun ermittelbare Presskraft im Prozess $F_{Ko}(s_{ST})$ entspricht jedoch noch nicht der tatsächlich im Prozess auftretenden Presskraft $F_{N.ZB}$ in der Ziehbüchse. So besitzt die Temperatur der Ziehwerkzeuge einen wesentlichen Einfluss auf den Widerstand, den das Material der Verdichtung entgegensetzt. Folglich wird zur Beschreibung der Materialtemperatur in Abhängigkeit vom Stempelweg die Funktion

$$T_{Mat}(s_{ST}) = T_U + (T_{max} - T_U) + \left(\frac{s_{ST}}{s_{ST.in2}}\right)^{\frac{1}{5}} \quad (D.21)$$

genutzt. Die notwendige maximale Temperatur kann mit

$$T_{max} = \frac{E_{ges}}{3} \quad (D.22)$$

wobei E_{ges} der Temperatursumme der Werkzeugtemperaturen entspricht, ermittelt werden. Folglich kann damit und dem gültigen Minimum E_{min} und Maximum E_{max} der

Temperatursumme der empirische Temperatureinflussfaktor K_T nach Gleichung D.23 berechnet werden.

$$K_T(s_{ST}) = \left[1 - \frac{T_{Mat}(s_{ST})}{T_{max}} + \frac{T_U}{T_{max}}\right] * [(K_{E.max} - K_{E.min}) * (1 - \frac{E_{ges} - E_{min}}{E_{max} - E_{min}}) + K_{E.min}] \quad (D.23)$$

Die Abhängigkeit der Temperaturwirkung von der Komprimierung soll nun noch mit der maximalen κ_{max} und minimalen κ_{min} Komprimierung zu

$$K_K = K_{K.min} + (K_{K.max} - K_{K.min}) * (1 - (\frac{\kappa_{Fa}(s_{ST.min}) - \kappa_{min}}{\kappa_{max} - \kappa_{min}})^{\frac{1}{5}}) \quad (D.24)$$

berechnet werden, sodass im Anschluss nun die tatsächliche Presskraft mit Gleichung D.25 ermittelbar wird.

$$F_{N.ZB}(s_{ST}) = p_{Ko}(s_{ST}) * A_{Ko}(s_{ST}) * K_T(s_{ST}, E_{ges}) * K_K \quad (D.25)$$

Zur Modellierung der, von der Temperaturdifferenz ΔT zwischen Stempel und Zieh-
büchse abhängigen Stauchkraft, wird ein weiterer Einflussfaktor eingeführt (Gleichung D.26).

$$K_{\Delta T} = K_{\Delta T.max} - (K_{\Delta T.max} - K_{\Delta T.min}) + \frac{\Delta T - \Delta T_{min}}{\Delta T_{max} - \Delta T_{min}} \quad (D.26)$$

wobei ΔT_{min} und ΔT_{max} dem Minimum und Maximum der Temperaturdifferenz entsprechen. Die Stauchkraft einer Falte berechnet sich daraufhin nach

$$F_{St.1F} = K_T(s_{ST}) * K_{\Delta T} * \frac{F_{St.MD} + F_{St.CD}}{2} \quad (D.27)$$

Weiterhin soll nun der Verlauf wirksamer Falten $i_{F.w}(s_{ST})$ mit

$$i_{F.w}(s_{ST}) = i_{F.Start} + (i_{F.Start} * K_{\delta} - i_{F.Start}) * \frac{s_{ST} - s_{ST.1}}{s_{ST.2} - s_{ST.1}} \quad (D.28)$$

berechnet werden. Dafür wird neben der zum Ziehvorgang wirksamen Faltenzahl $i_{F.Start}$ auch der Einflussfaktor K_{δ} benötigt. Dieser beschreibt die Abhängigkeit des Anstiegs der wirksamen Faltenanzahl über dem Stempelweg von der Temperaturdifferenz, der Temperatursumme sowie der Faltenhalterkraft. Mit den Extremwerten δ_{min} und δ_{max} der Faltenabstände innerhalb des dreidimensionalen Parameterraumes wird er zu

$$K_{\delta} = K_{\delta.min} + (K_{\delta.max} - K_{\delta.min}) * \frac{\delta_{Fa} - \delta_{min}}{\delta_{max} - \delta_{min}} \quad (D.29)$$

ermittelt. Zur Berechnung wird folglich darüber hinaus der mittlere Faltenabstand δ_{Fa} (Gleichung D.30) benötigt.

$$\delta_{Fa} = K_T(E_{ges}) * K_{\Delta T} * [\delta_{Fa.min} + (\delta_{Fa.max} - \delta_{Fa.min}) + (1 - (\frac{F_{FH} - F_{FH.min}}{F_{FH.max} - F_{FH.min}})^{\frac{1}{2}}))] \quad (D.30)$$

Hierbei werden die Faltenabstände an den Grenzen des Geltungsbereiches der Faltenhalterkraft mit $\delta_{Fa.min}$ und $\delta_{Fa.max}$ bezeichnet. So kann nun die im Prozess aufzubringende Stauchkraft, die auf dem Stempel wirkt, nach Gleichung D.31 berechnet werden.

$$F_{St}(s_{ST}) = i_{F.w}(s_{ST}) * F_{ST.1F}(s_{ST}) \quad (D.31)$$

Zusammen mit der Reibkraft unter dem Faltenhalter erzeugt sie eine Zugbeanspruchung im Material. Mit der theoretisch ertragbaren Zugbeanspruchung im Material in Quer- und Längsrichtung $F_{Z.Br.MD}$ bzw. $F_{Z.Br.CD}$ berechnet sie sich zu

$$F_{Z.Br}(s_{ST}) = K_T(s_{ST}) * \frac{F_{Z.Br.MD} + F_{Z.Br.CD}}{2} * \frac{U_z(s_{ST})}{b_{Pr}} \quad (D.32)$$

Der benötigte stempelwegabhängige Umfang des Zuschnittes $U_z(s_{ST})$ wird ermittelt mit

$$U_Z(s_{ST}) = (D_{ZB} + 2 * s_{ST}) * \pi \quad (D.33)$$

Für die Modellierung der Biegekräfte $F_{B.1}(s_{ST})$ und $F_{B.2/3}(s_{ST})$ am Stempel wird zunächst durch Interpolation von Messpunkten aus einem Biegeversuch mit spezifischen prozessnahen Bedingungen, der Kraftverlauf $F_{int}(s_{ST})$ angenähert. So dann kann anschließend mit

$$F_{B.1}(s_{ST}) = F_{B.int}(s_{ST}) * \frac{U_{ST}}{2 * b_{Pr}} * (1 - \mu_{ZB}) \quad (D.34)$$

die erste Biegekraft ermittelt werden. Die Kenntnis von Stempelumfang U_{ST} , Probenbreite b_{Pr} beim Versuch und Reibkoeffizient μ_{ZB} werden dabei vorausgesetzt. Ähnlich kann die folgende Biegekraft durch

$$F_{B.2/3}(s_{ST}) = F_{B.int}(s_{ST}) * \frac{U_{ST}}{2 * b_{Pr}} * \frac{U_Z(s_{ST})}{U_{ZB}} * (1 - \mu_{ZB}) \quad (D.35)$$

ermittelt werden. Neben dem Umfang U_{ZB} der Ziehbüchse wird hier auch wieder der stempelwegabhängige Umfang des Zuschnittes $U_Z(s_{ST})$ benötigt. Die aufgestellten Biegekräfte wirken bis das Material bei $s_{ST.in1}$ vollständig in die Ziehbüchse eingezogen ist.

D.3 Modellierung der Reibkräfte

Die Modellierung nach HAUPTMANN erfolgt unter Annahme Coulomb'scher Reibung. Zunächst werden die durch eine Messung ermittelten Gleitreibungskoeffizienten für die Ziehbüchse μ_{ZB} und den Faltenhalter μ_{FH} benötigt. Mit diesen folgt dann für die einzelnen zuvor erklärten Reibkräfte, zunächst für die Reibkraft unter dem Faltenhalter bis zum vollständigen Verlassen des Materials aus der Ziehbüchse

$$F_{R.FH}(s_{ST}) = F_{FH} * (\mu_{ZB} + \mu_{FH}) \quad (D.36)$$

sowie für die Reibkraft in der Ziehbüchse

$$F_{R.ZB}(s_{ST}) = F_{N.ZB} * \mu_{ZB} \quad (D.37)$$

Es folgt die Berechnung der Reibkraft an der Ziehbüchsenrundung mit Hilfe der Eytelwein'sche Gleichung der Seilreibung nach

$$F_{R.EK}(s_{ST}) = (e^{\mu_{ZB} * \alpha} - 1) * (F_{St}(s_{ST}) + F_{R.FH}(s_{ST})) \quad (D.38)$$

mit dem Umschlingungswinkel α und der stempelwegabhängigen Stauchkraft $F_{ST}(s_{ST})$

E Anforderungsliste für die GUI

Eingabe			
Allgemein	Anforderung		
Eingabe in Edits	Eingabe für jeden numerischen Wert so begrenzen, dass der Wert vorgesetzte Grenzen (Min und Max) nicht über- bzw. unterschreitet. Sorge dafür tragen, dass nur positive Zahlen eingegeben werden können. Bei Missachtung ist die Ausgabe einer Fehlermeldung zu realisieren und die Darstellung der Ausgabe entsprechend zurückzusetzen.		
Eingabe über Sliders	Minimum und Maximum des einzugebenden numerischen Wertes durch Intervallbreite des Sliders anpassen		
Eingabe über Edits und Sliders	Der über eines der Elemente eingestellte Wert muss stets auf das andere Element übertragen werden, sodass beide den identischen Wert aufzeigen.		
Eingabe von	Eingabe verfügbar für	Anforderung	
Faltenhalterkraft	Exp, Nov	<u>konstante FH-Kraft</u> Eingabe über Slider und Edit	<u>Lineare FH-Kraft</u> Eingabe jeweils für obere und untere Grenze über einen Slider und Edit, Begrenzung vorsehen: Wert des oberen Sliders darf den des unteren nicht unterschreiten
		Auswahl, ob konstante oder lineare FH-Kraft eingegeben wird, soll über Radiobutton erfolgen. Die Eingabeelemente sind dementsprechend sichtbar bzw. nicht sichtbar zu machen.	
Stempeltemperatur	Exp, Nov	Eingabe über Slider und Edit	Begrenzung der Eingabe durch gemeinsame Summe und Differenz (Modellgrenzen beachten)
Ziehbüchsentemperatur	Exp, Nov	Eingabe über Slider und Edit	
Umgebungstemperatur	Exp, optional Nov	Eingabe über Slider und Edit	
Ziehhöhe, Radius der Formteilgrundfläche, Höhe der Ziehbüchse, Radius der Ziehbüchse, Radius des Stempels, Reibkoeffizient der Ziehbüchse, Reibkoeffizient des Faltenhalters, Koeffizient für die thermische Längenänderung	Exp, optional Nov	Eingabe jeweils über Edit	
Einstellung der Optima der Kenngrößen für die	Exp	Eingabe jeweils über Edit, Verwendung eines Popup-Menüs zur Auswahl der spezifischen	

Referenzdarstellung, des Toleranzbereiches für ein qualitätsgerechtes Ziehteil und der Achslänge hinsichtlich des Intervalls		Einstellung. Dementsprechend müssen jeweilige Edits ein- bzw. ausgeblendet werden.
Einstellung der Ansicht für den Novizen	Exp	Einstellung über ein Menü, sodass je nach Bedarf Einstellungen (Umgebungstemperatur, Ziehhöhe, Radius der Formteilgrundfläche, Höhe der Ziehbüchse, Radius der Ziehbüchse, Radius des Stempels, Reibkoeffizient der Ziehbüchse, Reibkoeffizient des Faltenhalters, Koeffizient für die thermische Längenänderung) für Novizen verfügbar gemacht oder gesperrt werden.
Auswahl der Ansicht	Exp, Nov	Einstellung über Menü
Ausgabe		
Ausgabe von	Anforderung	
Charakteristische Kenngrößen des Stempelkraftverlaufes (F1, F2, F3, F4, A1, A1)	Darstellung in einem Netzdiagramm durch Verbinden der einzelnen Achswerte zu einem Hexagon, Gegenüberstellung beider Graphen	Liegt der Graph in dem gültigen Toleranzbereich für ein qualitätsgerechtes Ziehteil, so soll er grün gefärbt werden. Andernfalls ist er rot darzustellen.
Charakteristische Kenngrößen des Stempelkraftverlaufes für ein optimales Ziehteil		Hexagon sollte stets symmetrisch sein und jede Kante sollte die gleiche Länge besitzen